

Mestrado Integrado em Engenharia Química

Caraterização e comparação de materiais compósitos

Dissertação de Mestrado

de

Ana Luísa Moreira de Azevedo

Desenvolvida no âmbito da unidade curricular de Dissertação

realizado em

M.A.R. Kayaks, Lda.



Orientador na FEUP: Dr. Ricardo Santos

Orientador na M.A.R. Kayaks, Lda.: Eng. Nuno Ramos



Departamento de Engenharia Química

Julho 2017

Agradecimentos

Este trabalho não teria sido possível sem o auxílio de algumas pessoas e instituições a quem, desde já, quero agradecer.

Agradeço à empresa M.A.R. Kayaks, Lda, por me ter recebido nas suas instalações e colocado ao dispor todos os equipamentos e materiais necessários.

Ao Engenheiro Nuno Ramos pela disponibilidade e amabilidade com que me recebeu na empresa.

Ao INEGI, em especial à Andreia Durães, pela disponibilidade e ajuda prestada nos ensaios experimentais.

Ao meu orientador, Doutor Ricardo Santos, que desde o início me acompanhou, pela transmissão de conhecimentos.

Por fim, agradeço aos meus pais e amigos por todo o apoio ao longo dos últimos cinco anos.

Resumo

Na indústria naval é fundamental aliar a leveza à resistência das embarcações. Para tal o uso de materiais compósitos é bastante importante para satisfazer esta condição. Efetivamente, os materiais compósitos estão cada vez mais a apoderarem-se das grandes indústrias nomeadamente aeronáuticas, civil, dos transportes, entre outras, e têm prevalecido nelas devido às suas características.

A presente dissertação pretende introduzir um procedimento laboratorial para desenvolvimento de produtos com base na caracterização de materiais compósitos utilizados pela empresa M.A.R Kayaks, Lda, e comparar diferentes resinas. O material do reforço de cada compósito permaneceu igual sendo que a única diferença foi a matriz polimérica utilizada. Assim, foram realizados testes de tração (ASTM D 3039), testes de flexão (ISO 14125) e uma análise dinâmico-mecânica (ASTM D 7028) para avaliar os diferentes materiais.

O material que continha a resina L foi o que apresentou, ligeiramente, valores de módulos de elasticidade superiores. Desta forma, pode-se dizer que o compósito que possui esta resina é o mais resistente. No entanto, os outros materiais assumiram valores bastante próximos ao deste.

Relativamente às temperaturas de transição vítrea, os valores encontrados foram todos bastante próximos uns dos outros. A temperatura de transição vítrea das resinas ronda os 70 °C e dos compósitos é cerca de 145 °C.

Os valores de resistência encontrados são muito semelhantes nos materiais testados. Além disso, o preço das resinas é aproximadamente o mesmo pelo que a decisão é baseada em características de processamento do material. Assim, no caso de laminação manual, a menor viscosidade da resina S é o fator decisivo.

O procedimento desenvolvido neste trabalho foi feito a partir do zero e agora está disponível na empresa M.A.R Kayaks, Lda, sob a forma de um guião escrito.

Palavras-Chave: Materiais compósitos, resina, ensaios de flexão, ensaios de tração, análise dinâmico-mecânica.

Abstract

In the naval industry it is essential to combine lightness with the resistance of the vessels. Therefore, the use of different composite materials is very important to satisfy this condition. Actually, the composite materials are taking over large industries such as aeronautics, civil, transport, among others, and they have succeeded because of their characteristics.

The present disertation intends to introduce a laboratorial procedure to develop products based on the characterization of the composite materials which are used by the company M.A.R Kayals, Lda, and compare different resins. The reinforcing material of each composite remained the same, the only difference was the polymeric matrix used. Traction tests (ASTM D 3039), bending tests (ISO 14125) and a dynamic-mechanic analysis (ASTM D 7028) were performed to benchmark the different resins.

The material that contains resin L was the one who presented slightly higher values of elasticity modulus. This means that the composite which contains that resin is the more resistant. However, the other materials took values very close to them.

Relative to the glass transition temperatures, the values found were, all of them, quite close to each other. The glass transition temperature is approximately 70°C for the resins and 145°C for the composites.

The values of resistance found are very similar in the materials tested. Furthermore, the price of the resins is approximately the same and so the decision is based on material processing characteristics, in the case of lamination by manual procedures the lower viscosity of the S resin is the decisive factor.

The procedure developed in this work for product development was made from scratch, and it is now available at M.A.R Kayals, Lda, in the form of a written guide.

Keywords: composite materials, resign, flexural tests, tensile tests, dynamic-mechanical analysis.

Declaração

Declara, sob compromisso de honra, que este trabalho é original e que todas as contribuições não originais foram devidamente referenciadas com identificação da fonte.

Segunda-feira, 3 de Julho de 2017

(Ana Luísa Moreira de Azevedo)

Índice

1	Introdução.....	1
1.1	Enquadramento e Apresentação do Projeto	1
1.2	Apresentação da Empresa	1
1.3	Contributos do Trabalho.....	2
1.4	Organização da Tese	2
2	Materiais Compósitos.....	5
2.1	Perspetiva Histórica	5
2.1.1	Perspetiva Histórica dos Materiais nas Embarcações	5
2.2	Definição.....	6
2.3	Termoplástico e Termoendurecível	8
2.4	Resinas Termoendurecíveis	8
2.4.1	Resina Epóxi.....	9
2.5	Elementos de reforço	9
2.5.1	Fibras de Vidro	10
2.5.2	Fibras de Carbono.....	11
2.5.3	Polycarbonato	12
2.6	Laminação Manual	12
3	Materiais e Métodos	15
3.1	Introdução.....	15
3.2	Material e processo de fabrico	15
3.3	Provetes	17
3.4	Teste de flexão	18
3.5	Teste de tração.....	21
3.6	Análise Dinâmico-Mecânica	23
4	Resultados e discussão.....	25
4.1	Teste de flexão	25
4.2	Teste de Tração	27

4.3	Análise Dinâmico-Mecânica	29
4.4	Análise de sensibilidade	36
5	Conclusões	39
5.1	Limitações e Trabalho Futuro	40
5.2	Apreciação Final	40
6	Referências	41
Anexo 1		43
Anexo 2		45
Anexo 3		47
Anexo 4		49
Anexo 5		51
Anexo 6		53

Notação e Glossário

F - Carga	N
s - Deflexão	mm
L - Distância entre suportes	mm
h - Espessura da amostra	mm
b - Largura da amostra	mm
d - Deslocamento	mm
A_{st} - Área da secção transversal do provete	mm ²
E - Módulo de elasticidade estático, de Young ou de armazenamento	GPa
E' - Módulo de elasticidade oscilatório	MPa
T_g - Temperatura de transição vítrea	°C
$F_{máx}$ - Carga máxima suportada pelo provete	N

Letras gregas

σ	Tensão	MPa
σ_r	Tensão de rotura	MPa
ε	Deformação	
ε_r	Deformação à rotura	

Lista de Siglas

3D - três dimensões

CAD - Computer Aided Design

CAM - Computer Aided Manufacturing

ASTM - American Society for Testing and Materials

ISO - International Organization for Standardization

DMA - Análise Dinâmico-Mecânica

1 Introdução

1.1 Enquadramento e Apresentação do Projeto

Na indústria naval é fundamental aliar a leveza à resistência das embarcações. Para tal o uso de materiais compósitos é bastante importante para satisfazer esta condição. Efetivamente, os materiais compósitos estão cada vez mais a apoderarem-se das grandes indústrias nomeadamente aeronáuticas, civil, dos transportes, entre outras, e têm prevalecido nelas devido às suas características. Deste modo, está implícito o aparecimento de variadas resinas que diferem na sua composição e propriedades.

Este projeto consiste na caracterização das propriedades mecânicas de três materiais compósitos de matriz termoendurecível produzidos na empresa. Os materiais variavam no tipo de resina utilizada mas os elementos de reforço permaneciam iguais. O método de reprodução das amostras foi, tal como acontece na fábrica, por laminagem manual. Assim, foi possível averiguar quais das três resinas seria a mais vantajosa para o uso em questão.

Na caracterização dos compósitos foram efetuados testes de flexão, tração e uma análise dinâmico-mecânica para determinar a temperatura de transição vítrea de cada um.

1.2 Apresentação da Empresa

M.A.R Kayaks, Lda, mais conhecida por Nelo, é a empresa líder mundial na construção e comercialização de caiaques para alta competição, turismo, *fitness*, canoagem de mar, slalom e paracanoagem. A marca foi estabelecida em 1978, por Manuel Ramos, estando a sua fábrica e escritório sediados em Canidelo, Vila do Conde.

Atualmente, com cerca de 15 000 m², trabalham nas suas instalações mais de 100 funcionários. Com uma produção de, aproximadamente, 3500 barcos por ano e uma faturação que ronda os seis milhões de euros anuais, a empresa é responsável por uma fatia do mercado de canoas de alta competição que se aproxima dos 90 %. Da sua produção total, 99 % destina-se ao mercado externo enquanto que apenas 1 % das unidades são vendidas em Portugal.

Com o objetivo primordial de criar os melhores barcos, conciliando performance, estabilidade e conforto, a inovação é um critério transversal em todas as fases do desenvolvimento do seu produto. São utilizados métodos e equipamentos inovadores nomeadamente a simulação e comprovação do desempenho em ambiente real, a utilização de sistemas CAD para a modelação, CAM para prototipagem, e *scan* 3D para engenharia reversa. Assim, obtêm-se barcos com uma adição invulgar de características funcionais e numa

substancial superioridade técnica pelo que o resultado final resulta numa inquestionável inovação de produto.

Se nos seus primórdios a Nelo se focava, em exclusivo, na construção e comercialização de barcos, a missão atualmente assumida é muito mais abrangente. Neste sentido, a Nelo está presente nas principais provas da modalidade com uma equipa numerosa e um serviço completo e personalizado.

Adicionalmente, dispõe de locais onde os atletas e equipas podem treinar, ajustar e testar o seu barco. Estas tarefas são realizadas nos seus centros de treino, localizados em Montebelo, *ÁguaHotels Riverside* e Porto Antigo, onde as melhores condições e todo o material necessário são disponibilizados.

Recentemente, a Nelo, disponibiliza um serviço logístico de aluguer de barcos, a *Nelo Rental*, que permite aos atletas e equipas competirem com um barco igual àquele que possuem, em qualquer lugar.

A inovação constante resulta em novos produtos que vão além de barcos. Em 2015, a Nelo lançou duas aplicações *mobile*: a *Nelo Coach App* e a *Nelo Manager App*. Ambas as aplicações permitem monitorizar a rapidez, as remadas e o ritmo cardíaco, sendo que a *coach* se destina aos treinadores que necessitam de monitorizar o treino dos seus atletas e a *manager* para uso pessoal.

1.3 Contributos do Trabalho

Com este trabalho será possível caracterizar em termos mecânicos os compósitos utilizados na empresa bem como caracterizar as resinas utilizadas. Paralelamente, será possível averiguar qual a resina que se torna mais vantajosa para os fins pretendidos.

No caso de a empresa querer avaliar novos materiais, será deixado um protocolo para elaboração de testes mecânicos com as dimensões de amostras para cada teste, modo de execução e valores já obtidos.

1.4 Organização da Tese

O presente trabalho encontra-se dividido em 5 capítulos, os quais se encontram descritos da seguinte forma:

Capítulo 1

No presente capítulo, “Introdução”, é apresentado o enquadramento, a motivação e os objetivos da dissertação e a explicação da sua estrutura.

Capítulo 2

O segundo capítulo, “Materiais Compósitos”, aborda temas de revisão bibliográfica, entre os quais uma explicação do conceito de materiais compósitos, reforços e matrizes. Faz-se, também, uma apresentação sucinta das matérias- primas utilizadas e do processo de fabrico.

Capítulo 3

No terceiro capítulo, “Materiais e Métodos”, é indicado a constituição de cada laminado bem como o processo de fabrico. Para além disso, é feita uma descrição dos ensaios realizados, das normas que foram seguidas e do equipamento utilizado.

Capítulo 4

No quarto capítulo, “Resultados e Discussão”, são apresentados os resultados experimentais aos testes realizados bem como pequenas observações.

Capítulo 5

No quinto capítulo, “Conclusões”, são expostas algumas conclusões acerca do trabalho efetuado e dos resultados obtidos.

2 Materiais Compósitos

2.1 Perspetiva Histórica

Os compósitos surgiram nas primeiras sociedades agrícolas, por exemplo, em carroças contruídas com paus, ossos e chifres de animais [1]. No entanto, estes materiais aparecem com maior relevância na década de 1940 uma vez que nesta altura iniciou-se a comercialização da fibra de vidro nos Estados Unidos. A partir desta data pode-se falar em quatro gerações [2]:

- 1ª geração (1940) - Compósitos reforçados com fibra de vidro;
- 2ª geração (1960) - Compósitos de alto desempenho na era pós Sputnik;
- 3ª geração (1970) - Busca de novos mercados e sinergia de propriedades;
- 4ª geração (1990) - Materiais híbridos, nanocompósitos e estratégia biomimética.

Na primeira geração, os materiais compósitos tornaram-se bastante importantes na medida em que tornaram algumas estruturas leves e resistentes. Assim, foram usados em asas de aviões, em viaturas de combate, coletes de proteção, barcos, entre outros [2].

Na era seguinte, com o lançamento do satélite soviético Sputnik conclui-se que eram necessárias novas fibras para o reforço de naves e outros transportes espaciais. Surgiram, então, as fibras de carbono e boro bem como as fibras de aramida [2].

Com a descoberta de novas matérias-primas, na terceira geração, foi necessário procurar novas áreas de aplicação. Assim, as indústrias do desporto e dos automóveis tornaram-se os mercados mais importantes. Uma nova abordagem no *design* de material possibilitada pelo uso de computadores favoreceu a busca por sinergias de propriedades [2].

Por fim, na última era, os investigadores começaram a ampliar o paradigma dos compósitos para escalas cada vez menores [2].

Transporte, construção e aeroespacial foram os maiores segmentos de mercado dentro da indústria de compósitos em 2015, representando 62 % do seu valor total. O crescimento de materiais compósitos em aviões mais novos, como o Boeing 787 e Airbus 350 e 380, têm desempenhado um papel crucial neste setor [3].

2.1.1 Perspetiva Histórica dos Materiais nas Embarcações

Os caiaques e as canoas surgiram há milhares de anos e os seus materiais de fabrico eram bem diferentes dos atuais.

Originalmente, os caíques foram criados no Alaska e eram construídos essencialmente com ossos de baleia, peles e tripas de focas. Os ossos correspondiam à estrutura da embarcação e as tripas e peles ao revestimento.

As canoas mais antigas nomeadamente as canoas polinésias eram construídas com troncos de árvore, tornando-as bastante pesadas.

Atualmente, as embarcações são maioritariamente formadas por fibras de carbono e de vidro e algumas são de plástico [4.1].

2.2 Definição

Um compósito é um material resultante da mistura de dois ou mais componentes que diferem na forma e composição química e que são insolúveis uns nos outros. Assim, obtém-se um composto com propriedades que não se conseguem obter quando os constituintes estão isolados. Normalmente, os componentes podem ser facilmente identificados e exibem uma interface entre um e outro [5].

O componente em maior quantidade e que é contínuo designa-se matriz ou fase contínua. Esta é responsável pela forma final das peças, pela sua proteção de agressões externas e por manter as fibras nas direções desejadas. O reforço ou fase dispersa é a designação dada ao outro composto que tem como função aumentar as propriedades da matriz. O material do reforço normalmente em relação à matriz apresenta uma maior dureza, resistência mecânica e rigidez [5,6].

De forma a garantir as propriedades finais desejadas e tempos de processamento podem-se utilizar iniciadores, catalisadores ou aceleradores [5]. A Figura 1 ilustra as duas fases de um compósito.

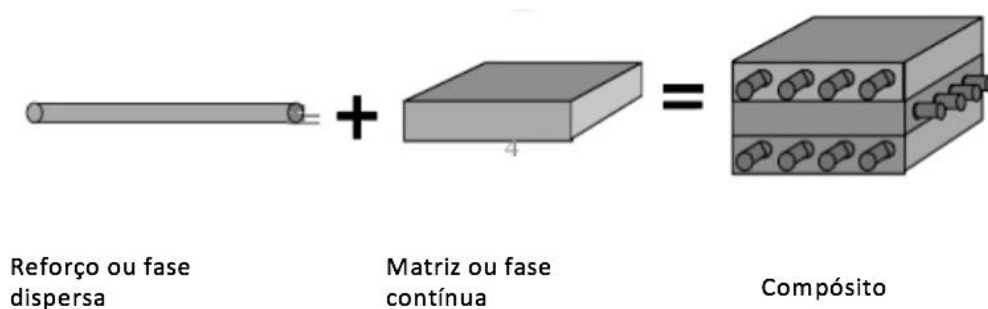


Figura 1 - Formação de um compósito [7].

As características do material final dependem dos componentes usados, interação entre materiais e do processo de fabrico utilizado. Paralelamente, depende da quantidade, forma e dimensões do reforço [5].

Os materiais compósitos podem ser classificados de acordo com o tipo de reforço (fibra ou partícula), como mostra a Figura 2.

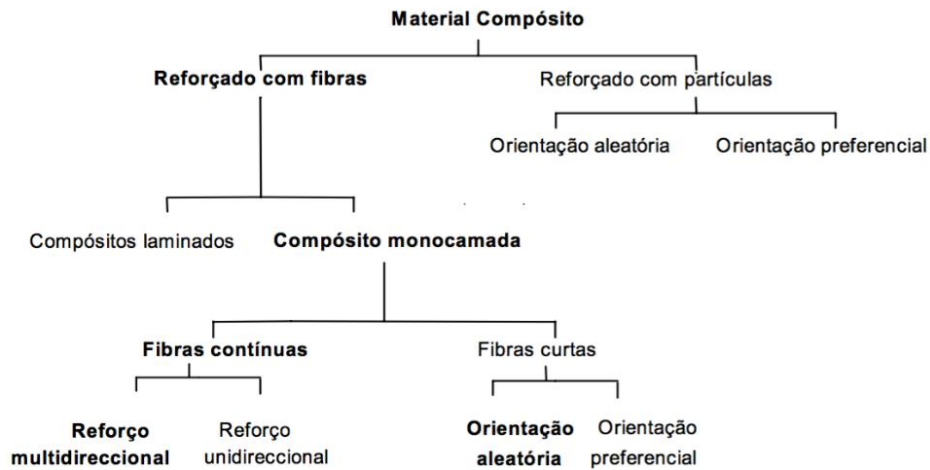


Figura 2 - Classificação dos materiais compósitos de acordo com os reforços [6].

No caso de compósitos reforçados com partículas os elementos ficam suspensos aleatoriamente na matriz. As partículas podem ter várias formas, tamanhos ou configurações. Este tipo de reforço é normalmente usado quando a força não é um dos requisitos [8].

Relativamente aos compósitos reforçados com fibras, estas podem ser contínuas ou descontínuas. Trata-se de fibras contínuas se a razão entre o comprimento e o diâmetro for muito elevada, superior a 1000, e o diâmetro variar entre 3-200 μm . Estas fibras podem estar distribuídas na matriz em várias camadas, designados por laminados, ou numa só camada tendo uma distribuição unidireccional ou em malha [8].

As fibras descontínuas apresentam uma razão entre o comprimento e o diâmetro que varia entre $5 < l/d < 1000$ e os diâmetros encontram-se numa gama de 0,02 a 100 μm . As fibras descontínuas podem apresentar uma orientação em determinada direção ou uma distribuição aleatória, considerando-se em ambos os casos como uma única camada [8].

De acordo com a natureza da matriz, os compósitos podem ser classificados como metálicos, cerâmicos ou poliméricos.

Os compósitos de matriz metálica utilizam o alumínio, magnésio, titânio, entre outros metais, como matriz e reforços normalmente constituídos por fibras ou partículas de carboneto de silício ou alumina. As principais aplicações destes compósitos destinam-se ao setor industrial dos transportes, à área militar, aeroespacial, desportiva e eletrónica [9-10].

Os compósitos de matriz cerâmica usam a cerâmica como matriz e as fibras de vidro, de carbono e de carboneto de silício, entre outras, como reforços. Estes compósitos são leves, rígidos e resistentes sendo, portanto, empregues na indústria aeronáutica e militar, artigos de desporto e em carroçarias de automóveis [9].

Os compósitos de matriz polimérica utilizam como matriz um polímero e para reforço praticamente qualquer tipo de fibra natural ou sintética e ainda podem utilizar boro ou alumínio. As matrizes poliméricas usadas podem ser do tipo termoendurecível ou termoplástica, apresentando diferenças ao nível do processamento e das propriedades finais [5-6].

2.3 Termoplástico e Termoendurecível

Os polímeros termoplásticos são formados por moléculas de grandes dimensões e que não reticulam entre si, ou seja, não formam ligações cruzadas com as moléculas vizinhas. Nos termoplásticos, as ligações secundárias, ligações de hidrogénio e forças de Van Der Waals, são responsáveis pelas macromoléculas se manterem nas suas posições. Quando o polímero é aquecido estas ligações são temporariamente quebradas permitindo que este possa ser fundido e solidificado diversas vezes (reprocessamento). Comparativamente com os termoendurecíveis, os termoplásticos são mais tenazes, menos higroscópicos, mais resistentes ao impacto e podem ser reciclados. Os polímeros termoplásticos mais comuns são a poliamida, propileno, policarbonato, polietileno, policloreto de vinilo e poliéster termoplástico [11].

Os polímeros termoendurecíveis também chamados resinas termoendurecíveis são constituídos por cadeias moleculares que formam estruturas tridimensionais devido à reticulação entre as várias cadeias moleculares.

Neste tipo de resinas utilizam-se, habitualmente, uma mistura de dois ou três componentes: resina, acelerador e catalisador. A polimerização e reticulação podem ocorrer à temperatura ambiente logo após a mistura dos componentes ou através do fenómeno de cura por aplicação de calor e pressão. As cadeias do polímero ligam-se fortemente, por efeito da cura, tornando a estrutura rígida e ficando impossível a modificação da forma do produto por reaquecimento. Os polímeros termoendurecíveis apresentam algumas vantagens em relação aos termoplásticos nomeadamente a elevada estabilidade térmica e dimensional, baixa densidade, elevada rigidez, fácil impregnação das fibras, boas propriedades de isolamento térmico e elétrico. Os polímeros termoendurecíveis mais comuns são as resinas de poliéster insaturado, epóxi, fenólicas e vinil éster [3,11].

2.4 Resinas Termoendurecíveis

A principal função da resina na construção de embarcações é a de prender as fibras na posição desejada pelo operário e promover uma ação química contra a ação da água. Embora a resina tenha uma resistência inferior à das fibras, esta protege as fibras contra agressões externas nomeadamente contra a ação da água, abrasão e reações químicas [12].

2.4.1 Resina Epóxi

As resinas epóxi foram descobertas em 1909 por *Prileschajew*. Estas resinas são formadas a partir de uma vasta cadeia molecular com grupos radicais ativos “epóxido” nas extremidades, o que lhes confere uma boa resistência à humidade [13]. Os dois grupos aromáticos que se encontram no centro da estrutura molecular da resina de epóxido absorvem tensões mecânicas e térmicas, atribuindo-lhe boa rigidez, resistência e propriedades de resistência ao calor [14]. A estrutura química de um époxi encontra-se representada na Figura 3.

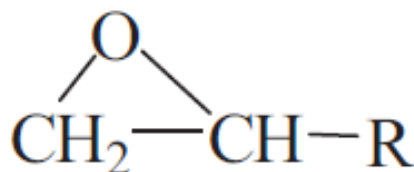


Figura 3 - Estrutura de um epóxido simples [12].

Através da reação da epícloridrina e do bisfenol A, em meio alcalino, obtêm-se as resinas epóxi mais usadas.

Para que ocorra uma reação de cura numa resina de epóxido é necessário adicionar-lhe um endurecedor. Após cura, as propriedades finais da resina dependem do endurecedor utilizado, do seu teor, da temperatura de cura e do tratamento pós-cura [15].

As resinas epóxi possuem uma elevada mobilidade molecular, no estado não curado, devido ao baixo peso molecular. Assim, a impregnação da resina nas fibras torna-se mais fácil. Estas apresentam, ainda, uma excelente combinação de propriedades mecânicas e resistência à corrosão e são relativamente baratas, apresentam uma boa adesão a vários tipos de substratos e boas propriedades elétricas. Para além disso, observa-se uma baixa contração após a cura (no máximo 2 %) e uma boa resistência à abrasão neste tipo de resina [15].

As resinas de epóxido, em comparação com outras resinas termoendurecíveis, são as que apresentam melhor desempenho, pois possuem propriedades mecânicas e resistência à degradação ambiental superiores [15].

2.5 Elementos de reforço

O material de reforço tem como objetivo conferir elevados níveis de resistência e rigidez a um material compósito.

2.5.1 Fibras de Vidro

A fibra de vidro, na sua forma mais antiga, foi desenvolvida pelos egípcios e usada na decoração. No entanto, apenas na década de 1930 é que a *Owens Illinois Glass Company* e a *Corning Glass Works* desenvolveram métodos de produção das fibras de vidro para fim comercial [8].

As fibras de vidro, Figura 4, apresentam uma estrutura amorfa e são compostas essencialmente por sílica, contendo outros óxidos como óxidos de boro, de cálcio, de ferro, de alumínio e de sódio [15]. Estas fibras são produzidas com diferentes composições químicas e, por isso, possuem propriedades distintas. Assim, as fibras de vidro podem ser classificadas em diferentes tipos: A, E, S e R [15].



Figura 4 - Fibra de Vidro [16].

A fibra de vidro do tipo E é a mais utilizada uma vez que é a menos dispendiosa e possui elevada resistência mecânica e elevada resistência elétrica. A fibra de vidro A é bastante alcalina sendo, por isso, substituída pela do tipo E. A fibra do tipo S é bastante cara uma vez que é muito resistente ao calor e à tração. Por fim, a fibra de vidro do tipo R apresenta bastante resistência química [15].

Quando se junta as fibras de vidro a uma resina forma-se um material com [17-18]:

- elevada resistência;
- baixa densidade;
- baixa condutividade térmica;
- alta resistência a ataques químicos;
- resistência ao fogo;
- boas propriedades de isolamento elétrico.

Tendo em conta todas as propriedades referidas e o facto de existir uma boa relação entre custo e benefícios, este material é bastante utilizado na construção de barcos.

2.5.2 Fibras de Carbono

Nos finais da década de 50, fibras de carbono de elevada resistência foram produzidas pela primeira vez por *Roger Bacon* [8]. As fibras de carbono são fabricadas através da pirólise de fibras orgânicas numa atmosfera inerte. Na produção destas fibras são importantes três matérias-primas: *rayon*, poliacrilonitrila e piche [19].

A fibra de carbono existe em dois padrões de tecelagem: *plain* e *twill*, Figura 5.

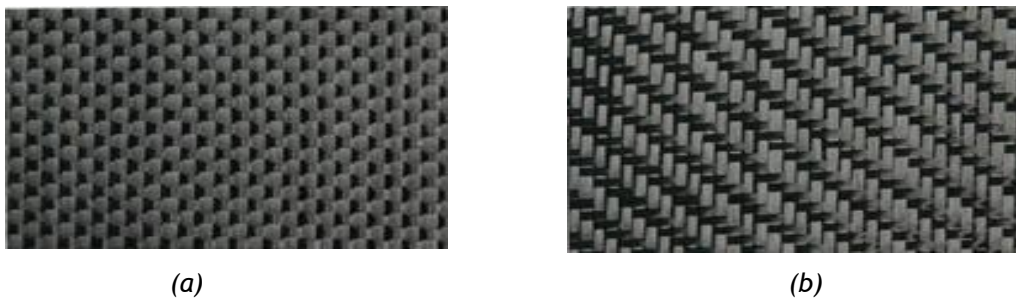


Figura 5 - (a) Fibra de carbono plain, (b) Fibra de carbono twill [19].

O carbono *plain* é o segundo tipo de tecido de carbono mais usado. Este padrão é um tecido ligeiramente mais apertado e, portanto, mais fácil de manusear sem distorcer. No entanto, não é tão drapeável como o *twill* e, por isso, não é a primeira escolha para contornos [20].

O carbono *twill* é o tipo de carbono mais utilizado. Este padrão é mais flexível do que o carbono *plain*, permitindo que o tecido drapeie mais facilmente. Desta forma, são úteis quando laminado em superfícies de moldes com curvas. Uma vez que o padrão é mais solto, deve ser trabalhado com mais cuidado [20].

Uma das características mais importantes das fibras de carbono é o facto de serem anisotrópicas, uma vez que a organização do carbono assume a configuração da grafite, ou seja, com ligações químicas mais fortes dentro de um mesmo plano e mais fracas em planos diferentes [21].

As fibras de carbono sozinhas não são apropriadas para uso mas quando combinadas com a matriz adquirem propriedades mecânicas excelentes. Normalmente, este material é usado em aplicações que requerem propriedades mecânicas elevadas, uma vez que apresentam uma baixa densidade, alta resistência mecânica e alto módulo de elasticidade. Paralelamente, é bastante leve e bastante estável, possui baixa abrasão, e é resistente a fatores químicos e biológicos. Para além disso, é resistente à fadiga e à corrosão [18].

Devido às suas características, este tipo de fibras é, normalmente, utilizado em barcos de alta competição.

2.5.3 Policarbonato

O policarbonato, Figura 6, é um poliéster linear obtido através da reação entre o bisfenol A e o gás fosgênio [22].

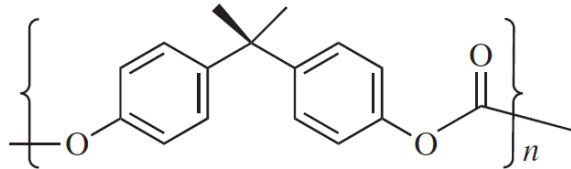


Figura 6 - Estrutura química do policarbonato [22].

A principal característica do policarbonato é a sua elevada transparência mesmo com espessuras consideráveis. O policarbonato possui, ainda, elevada resistência ao impacto, boas propriedades dielétricas, estabilidade dimensional bastante boa e boas propriedades térmicas. Paralelamente, apresenta elevado módulo de flexão, baixa contração no molde, boa retardança à chama e é um bom isolante [22].

2.6 Laminação Manual

Este processo é um dos mais antigos e simples e realiza-se com o molde aberto. Inicialmente, é necessário limpar o molde e colocar desmoldante. Para um bom acabamento superficial pode-se colocar gel coat na superfície do molde [8]. De seguida, as fibras são colocadas no interior do molde e a resina é introduzida e impregnada à mão com auxílio de rolos. As escovas são utilizadas para distribuir a resina uniformemente ao longo das fibras na resina e os rolos são utilizados para extrair as bolhas de ar do reforço. O laminado é deixado a curar nas condições atmosféricas normais ou a uma temperatura moderadamente elevada numa estufa [23]. A Figura 7 representa esquematicamente o processo de laminação manual.

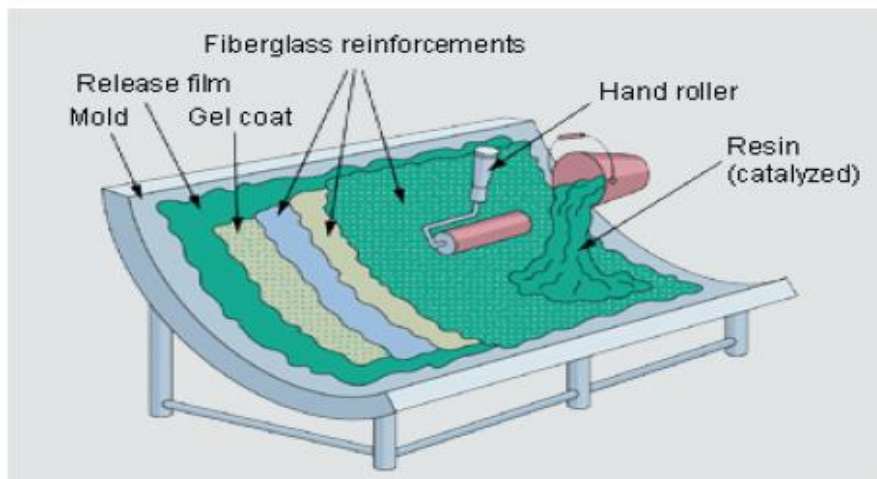


Figura 7 - Esquema de aplicação do processo de laminação manual [7].

As principais vantagens são a versatilidade de forma e do tamanho dos laminados, o baixo custo de equipamento e baixo custo de matérias-primas. Este método permite o uso de resinas com elevadas viscosidades [22]. Tem a desvantagem de a mistura da resina com o respetivo endurecedor, quantidade de resina no laminado e qualidade do laminado estarem muito dependentes da habilidade dos operadores e, por isso, os compósitos obtidos apresentam um desempenho inferior devido ao alto nível de vazios na matriz [24]. O controlo da espessura do compósito final é também difícil de controlar, dificultando o controlo do peso final da peça [8].

3 Materiais e Métodos

3.1 Introdução

Com o intuito de avaliar o comportamento mecânico dos compósitos realizaram-se testes de flexão, de tração e uma análise dinâmico-mecânica. Para a obtenção das propriedades que permitem caracterizar os compósitos foram usadas as seguintes normas:

ISO 14125 - Norma para a obtenção de propriedades de flexão de plásticos com e sem reforço e de materiais isolantes elétricos;

ASTM D 3039 - Norma para a obtenção de propriedades de tração de materiais compósitos de matriz polimérica;

ASTM D 7028 - Norma para a obtenção da temperatura de transição vítrea de materiais compósitos de matriz polimérica através da análise dinâmico-mecânica.

3.2 Material e processo de fabrico

Na construção das embarcações, os operadores, através de laminagem manual, intercalam a matriz (resina epóxi) com os elementos de reforço (fibras e polycarbonato). Seguidamente à moldagem manual os barcos são deixados a curar numa estufa de 45 °C durante 8 horas.

Neste estudo foram fabricados três laminados diferentes, mantendo a geometria de cada um mas variando entre si o tipo de resina utilizada. As resinas eram todas epóxi, no entanto os fornecedores da mesma e consequentes características variavam. Os laminados foram produzidos por laminagem manual e, posteriormente, curados a 45 °C durante 8h com o objetivo de reproduzir o método de fabrico usado na empresa, na etapa de desenvolvimento do produto.

A fabricação dos compósitos deu-se num molde de uma placa de alumínio. Primeiramente, colocou-se um desmoldante, cujo nome é *Loctite 700-NC*, com o intuito de tornar o desmolde da placa mais fácil. Depois a resina foi misturada com um endurecedor numa proporção, em peso, de 70:30. Seguidamente colocou-se alternadamente uma camada de resina e um tipo de reforço. Os tipos de reforço e ordem de colocação no molde encontram-se na Tabela 1. A matriz foi espalhada com auxílio de pincel e rolos para tentar homogeneizar e compactar as camadas da forma mais semelhante possível e para tentar evitar bolhas de ar e saliências.

No final, antes de deixar a curar, com o intuito de estabilizar a espessura da placa o molde foi apertado com batentes, como se pode ver na Figura 8. De salientar que as fibras eram multidirecionais e o ângulo usado entre as fibras foi de 0°.

Tabela 1 - Composição e ordem de colocação dos materiais no molde.

	Material A	Material L	Material S
Constituição	Resina A + Endurecedor	Resina L + Endurecedor	Resina S + Endurecedor
	Fibra de Carbono - <i>plain</i>	Fibra de Carbono - <i>plain</i>	Fibra de Carbono - <i>plain</i>
	Resina A + Endurecedor	Resina L + Endurecedor	Resina S + Endurecedor
	Fibra de Vidro	Fibra de Vidro	Fibra de Vidro
	Resina A + Endurecedor	Resina L + Endurecedor	Resina S + Endurecedor
	Policarbonato Rígido	Policarbonato Rígido	Policarbonato Rígido
	Resina A + Endurecedor	Resina L + Endurecedor	Resina S + Endurecedor
	Fibra de Carbono - <i>twill</i>	Fibra de Carbono - <i>twill</i>	Fibra de Carbono - <i>twill</i>
	Resina A + Endurecedor	Resina L + Endurecedor	Resina S + Endurecedor

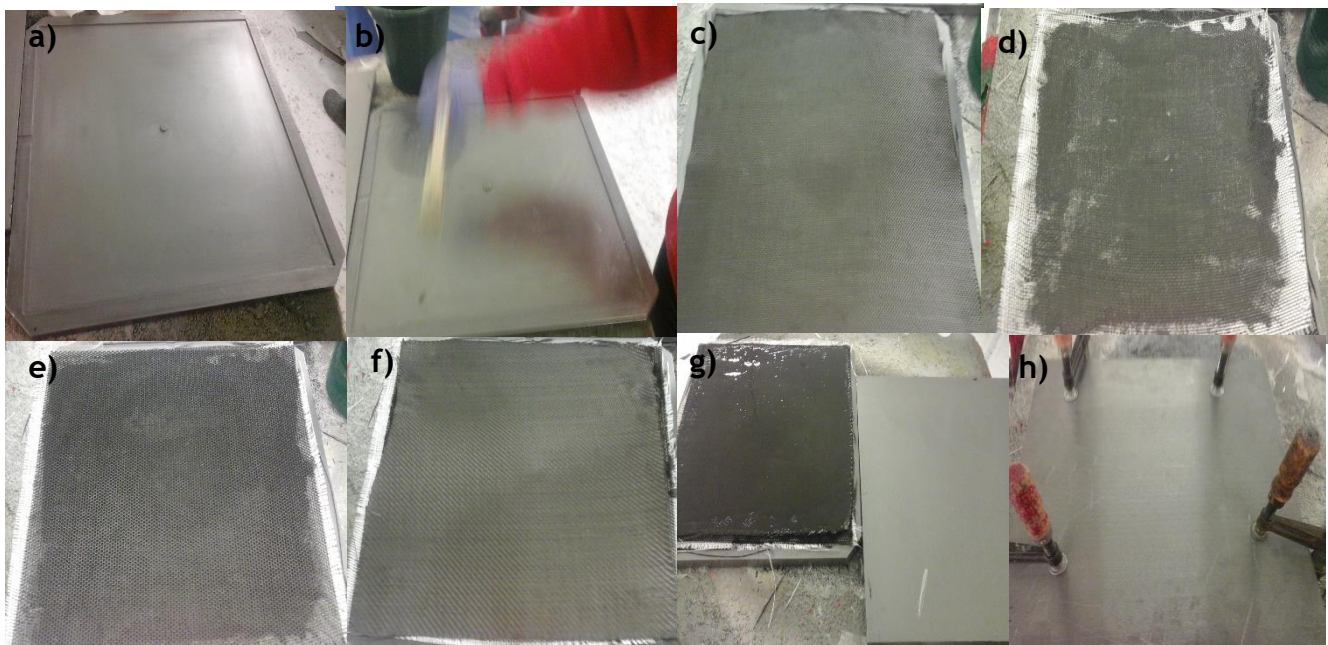


Figura 8 - Processo de laminação manual.

Como foi referido, depois de observado o método de fabrico, adaptou-se o método de modo a produzir várias amostras. A Figura 8 representa as diversas etapas do processo:

- a) Início do processo com aplicação de desmoldante na placa metálica. Para além disso, inicialmente mistura-se a resina com o endurecedor para posterior aplicação;
- b) Espalhamento da mistura de resina e endurecedor;
- c) Aplicação da fibra de carbono *plain* e colocação de uma camada da mistura de resina;
- d) Colocação de uma camada de fibra de vidro e de mais uma camada da mistura de resina;
- e) Aplicação de polycarbonato rígido e da mistura de resina e endurecedor;
- f) Aplicação da fibra de carbono *twill*;
- g) Aplicação da mistura de resina;
- h) O molde é fechado com ajuda de batentes.

É importante salientar que com o intuito de manter as amostras o mais homogéneas possíveis e com a mesma espessura, aplicou-se sempre a mesma quantidade da mistura de resina e endurecedor (350 g) em cada placa e cada elemento de reforço foi aplicado depois de se verificar visualmente que a resina estava bem espalhada.

Os compósitos constituídos por resina S serão denominados compósitos do tipo S ou material S, os que possuem resina A serão chamados do tipo A ou material A e, por fim, aqueles que impregam resina L serão os compósitos do tipo L ou material L.

As viscosidades das resinas dadas pelos fornecedores encontram-se na Tabela 2. Através da Tabela 2, verifica-se que a resina S apresenta uma viscosidade bastante inferior em relação às restantes.

Tabela 2 - Viscosidades das diferentes resinas.

Material	Resina S	Resina L	Resina A
Viscosidade (25 °C)	30 mPa.s	12000-15000 mPa.s	2396 mPa.s

3.3 Provetes

Os laminados foram feitos em placas de 400 mm × 400 mm de acordo com o indicado anteriormente.

Posteriormente, os provetes foram retirados destas placas com as dimensões e geometrias concordantes com cada norma de teste.

No corte dos provetes foi utilizada uma serra elétrica tendo-se especial atenção na velocidade de corte para não ocorrer delaminações e consequentes alterações estruturais do laminado. Para além disso, foi utilizado ar comprimido seco para evitar o aquecimento do compósito.

3.4 Teste de flexão

Através do uso da norma ISO 14125 foi possível obter as propriedades flexurais dos compósitos em estudo. As dimensões e geometria dos provetes seguiram as indicações desta norma e encontram-se representadas na Figura 9. A Figura 10 apresenta os provetes dos vários laminados.

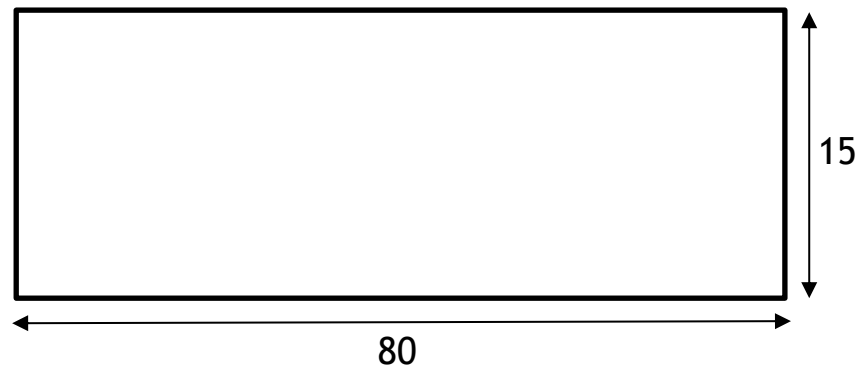
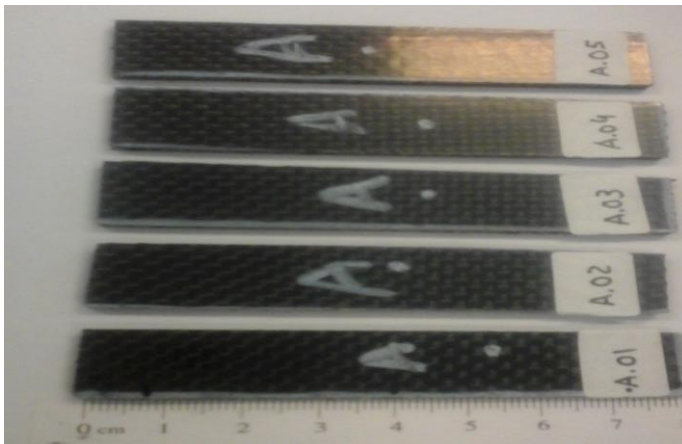
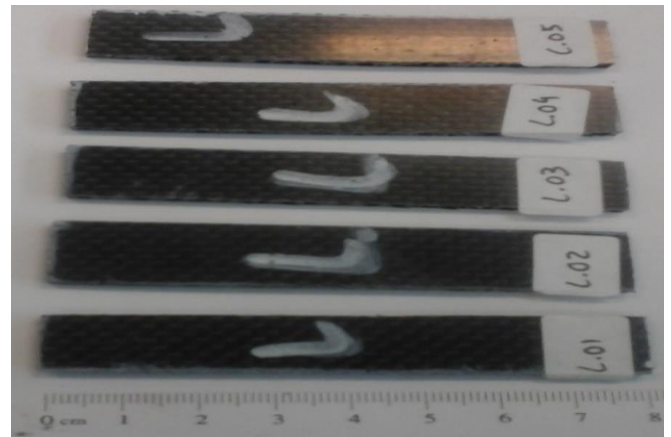


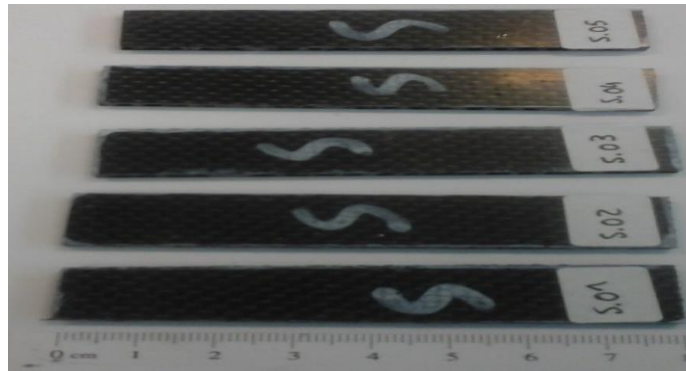
Figura 9 - Geometria e dimensões do provete em mm.



(a)



(b)



(c)

Figura 10 - (a) Provetes dos compósitos do tipo A, (b) Provetes dos compósitos do tipo L, (c) Provetes dos compósitos do tipo S.

Foram realizados cinco ensaios para cada tipo de resina perfazendo um total de quinze ensaios, recorrendo à máquina TiraTest 2705, Figura 11.



Figura 11 - Máquina TiraTest 2705.

Os ensaios foram realizados nas condições normais do laboratório, ou seja, a uma temperatura de 23 ± 2 [°C] e a uma humidade relativa de 50 ± 5 [%]. A carga de 5 kN foi aplicada até o ponto de falha com velocidade constante de 1 mm/min e usando um teste em três pontos, como se pode ver na Figura 12. O afastamento entre apoios foi de 64 mm.

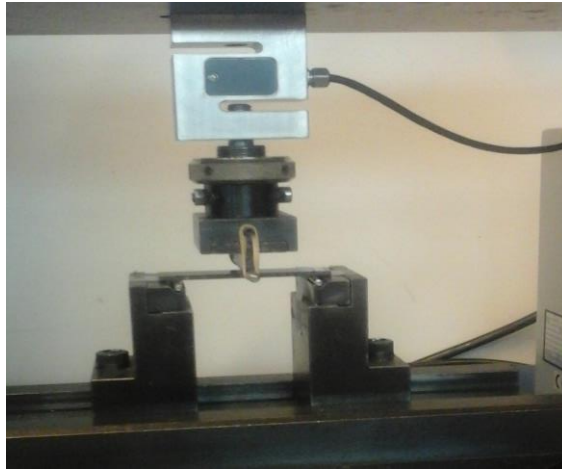


Figura 12 - Ensaio de flexão.

A resistência estática à flexão dos provetes é calculada a partir da seguinte equação:

$$\sigma = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (3.1)$$

Onde:

σ é a tensão à flexão (MPa);

F é a carga (N);

L é a distância entre os suportes (mm);

h é a espessura da amostra (mm);

b é a largura da amostra (mm).

A deformação, ε , correspondente à tensão pode ser obtido através de:

$$\varepsilon = \frac{6sh}{L^2} \quad (3.2)$$

Em que:

s corresponde à deflexão obtida no ensaio (mm).

Através da curva tensão-deformação consegue-se obter o módulo de elasticidade. O módulo de elasticidade, E , é uma medida relativa da dureza ou rigidez da resina e é importante para determinar a resistência ao desgaste.

Segundo a norma, o módulo de elasticidade é retirado da curva tensão-deformação através do declive na zona elástica, ou seja, na zona entre $0,05 \% < \varepsilon < 0,25 \%$.

3.5 Teste de tração

O ensaio de tração foi realizado segundo a norma ASTM D 3039 numa máquina INSTRON modelo 4208, Figura 13, equipada com uma célula de 100 kN e a velocidade do ensaio foi de 1 mm/min. As dimensões dos provetes utilizados encontram-se na Figura 14, de salientar que foram usados *tabs* para diminuir a concentração de tensões sentida na zona de aperto.



Figura 13 - Máquina INSTRON modelo 4208.

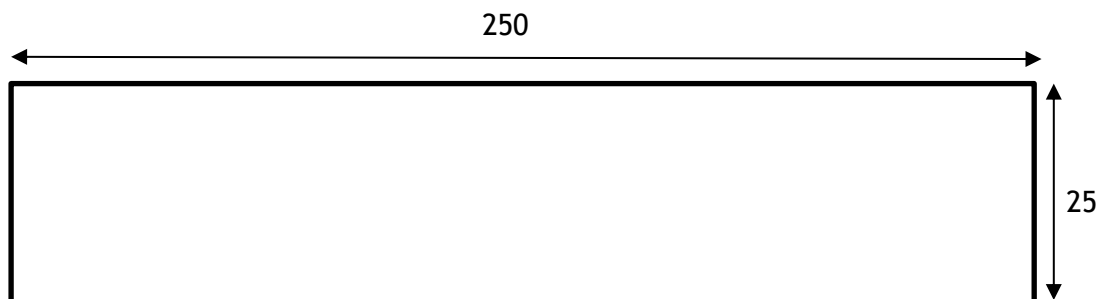


Figura 14 - Geometria e dimensões do provete em mm.

Tal como no ensaio de flexão, foram testadas cinco amostras de cada tipo de laminado, Figura 15. Os ensaios decorreram a uma temperatura de 23 ± 2 [°C] e a uma humidade relativa de 50 ± 5 [%].



(a)



(b)



(c)

Figura 15 - (a) Provetes dos compósitos do tipo A, (b) Provetes dos compósitos do tipo L, (c) Provetes dos compósitos do tipo S.

O equipamento forneceu dados referentes à força aplicada ao provete e respetivo deslocamento sofrido. Através destes, foi possível determinar a tensão pela seguinte expressão:

$$\sigma = \frac{F}{A_{st}} \quad (3.3)$$

Em que:

σ é tensão (MPa);

F é a força aplicada ao provete durante o ensaio (N);

A_{st} é a área de secção transversal do provete (mm²).

A deformação é dada por:

$$\varepsilon = \frac{d}{L} \quad (3.4)$$

Onde:

ε corresponde à deformação;

d deslocamento registado pelo equipamento durante o ensaio (mm);

L distância das garras (mm).

O módulo de elasticidade foi determinado da mesma forma do que no teste de flexão. Isto é, foi retirado pelo declive do gráfico tensão-deformação na zona elástica, ou seja, entre 0,05 % e 0,25 %.

3.6 Análise Dinâmico-Mecânica

Parte 1

A análise dinâmico-mecânica (DMA) é utilizada para caracterizar materiais podendo ser medidas várias propriedades entre as quais a temperatura de transição vítrea, módulo de perda e de armazenamento. Com vista a determinar estes parâmetros, analisou-se uma amostra de cada tipo de compósito. As dimensões das amostras encontram-se representadas na Figura 16 e as amostras na Figura 17.

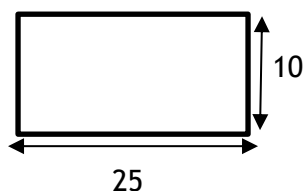


Figura 16 - Geometria e dimensões do provete em mm.

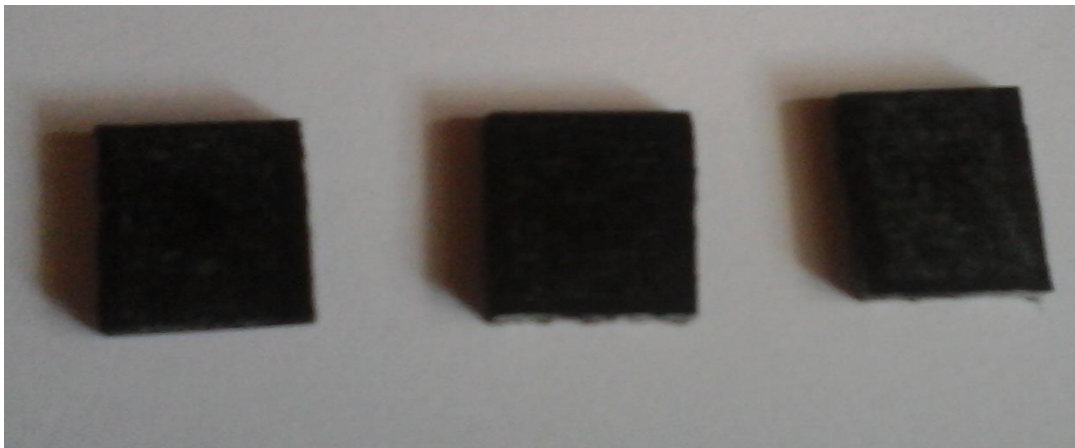


Figura 17 - Provetes (compósitos) para o primeiro teste DMA.

Para a realização das análises por DMA foi utilizada uma máquina da *TA Instruments*, modelo Q800, como se pode ver na Figura 18. Relativamente às condições de ensaio, foi realizada uma passagem com uma rampa de aquecimento de 30 °C até 200 °C, com uma taxa de aquecimento de 5°C/min, com uma frequência de 1 Hz e uma amplitude de oscilação de 10 µm.

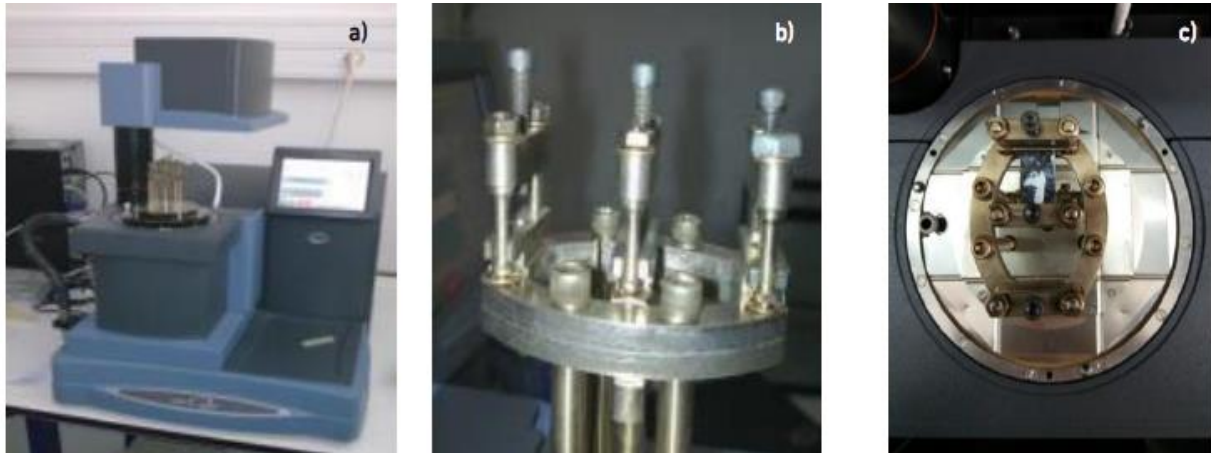


Figura 18 - Equipamento de ensaio de DMA: a) aparelho; b) suporte da amostra; c) amostra encastrada modo single cantilever.

Parte 2

Posteriormente, realizou-se uma segunda análise dinâmico-mecânica cujas amostras eram constituídas apenas pelas diferentes resinas ou seja sem elementos de reforço, Figura 19. A norma seguida bem como o equipamento e condições utilizadas foram as mesmas da Parte 1.



Figura 19 - Provetes (resinas) para o segundo teste DMA.

O principal objetivo da realização deste teste foi comparar as propriedades obtidas com elemento de reforço e sem elemento de reforço.

4 Resultados e discussão

4.1 Teste de flexão

A Figura 20 apresenta o gráfico força versus deslocamento para os três tipos de compósitos. Verifica-se que os laminados do material A necessitam de uma força bastante superior aos restantes para provocarem o mesmo valor de deslocamento.

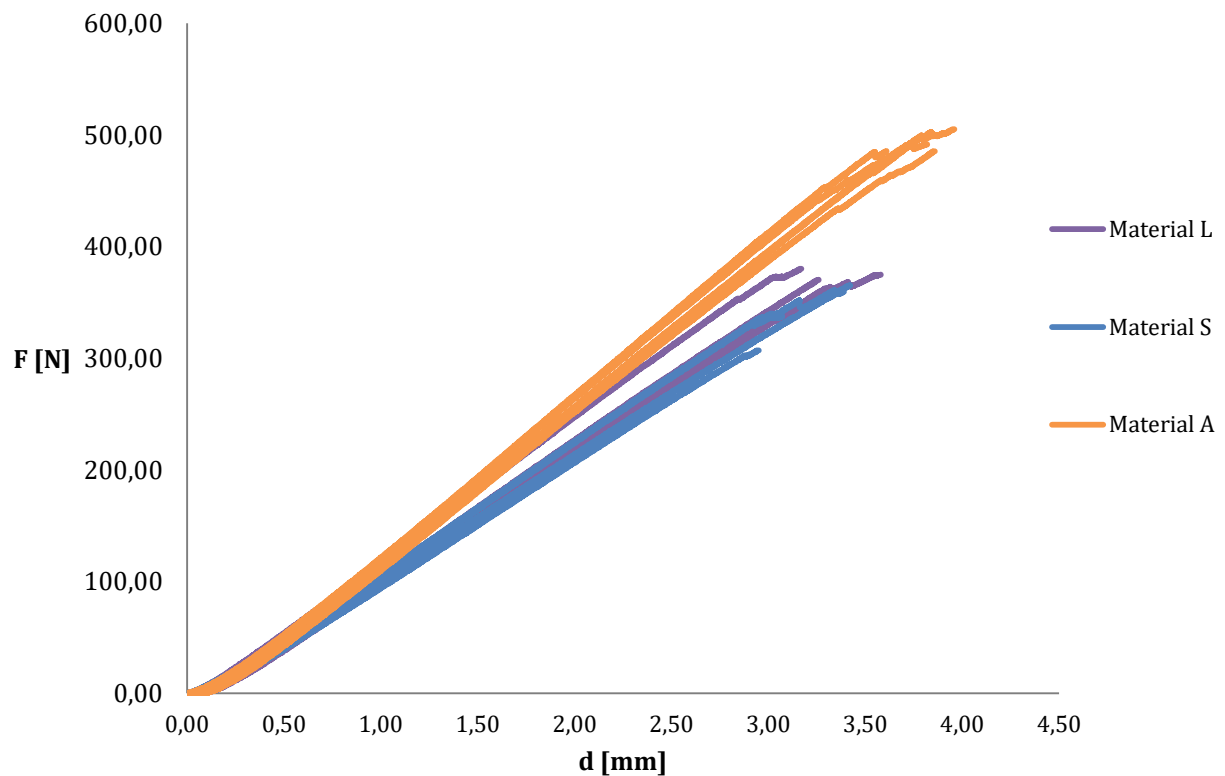


Figura 20 - Gráfico da força em função do deslocamento dos diferentes tipos de compósitos.

A Figura 21 apresenta o gráfico da tensão de rotura em função da deformação. Ambos os materiais apresentam uma tensão de rotura que varia aproximadamente entre os 200 MPa e os 300 MPa.

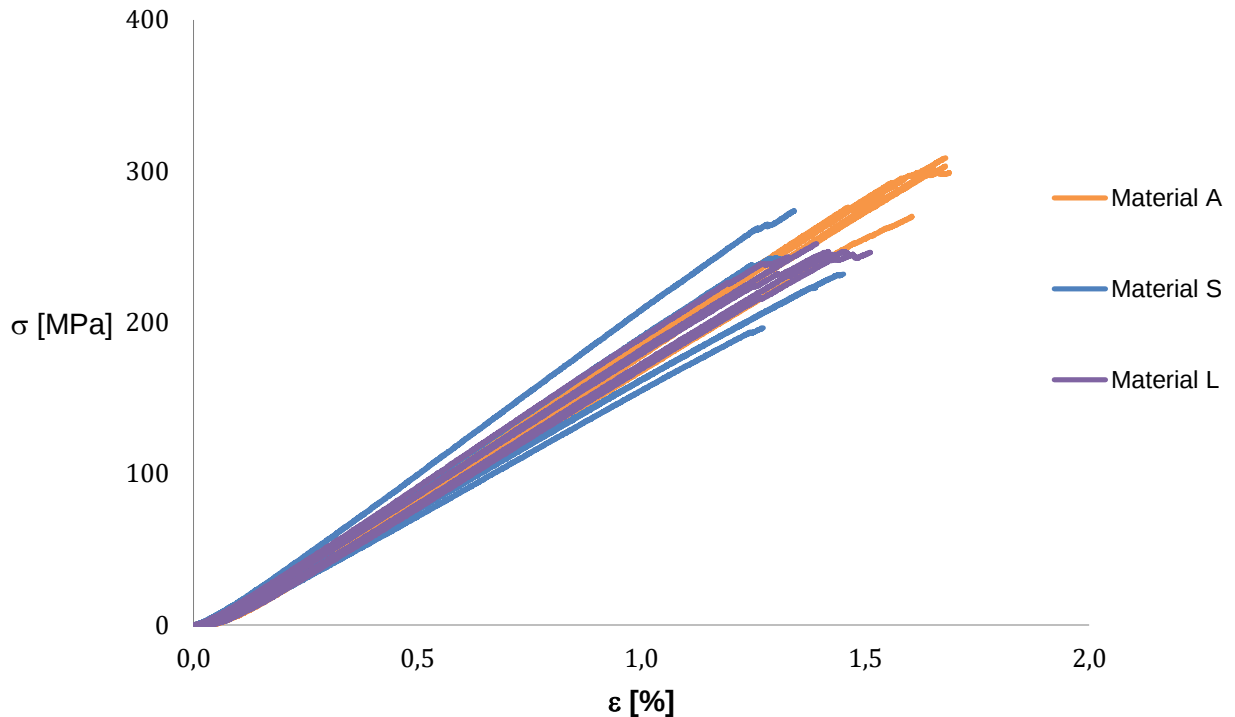


Figura 21 - Gráfico da tensão em função da deformação para os vários compósitos.

Os diferentes compósitos apresentaram um comportamento semelhante durante os ensaios. No fim do teste, observou-se uma deformação permanente no ponto de aplicação da carga, ou seja, no ponto médio do provete.

Os gráficos tensão em função da deformação e força em função do deslocamento, do teste de flexão, para cada material podem ser vistos com mais detalhe nos Anexos 1, 2 e 3.

Os resultados da média e desvio padrão das propriedades obtidos no ensaio encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3 - Propriedades mecânicas referentes ao teste de flexão.

Propriedades	$F_{máx}$ (N)			σ_r (MPa)			ε_r (%)			E (GPa)		
Material	A	L	S	A	L	S	A	L	S	A	L	S
Média	494	368	344	298	248	236	1,80	1,49	1,42	16,36	17,07	16,10
Desvio Padrão (%)	1,63	2,47	5,95	3,22	1,17	12,23	5,45	4,33	5,00	4,93	5,27	16,79

Para resistir a deformações e fraturas o módulo de elasticidade deve ser alto. Como se verifica na Tabela 3, os valores dos módulos de elasticidade são muito idênticos mas pode salientar-se que o compósito com resina L apresenta um ligeiro aumento desta propriedade. Este facto pode ser justificado pelas pequenas variações de monómeros na composição das resinas (constituídas maioritariamente por bisfenol A).

De acordo com os resultados no teste de flexão pode dizer-se que se tratam de materiais quebradiços uma vez que fraturam com pouca deformação, ou seja, $\epsilon_r < 5 \%$. Para além disso, como a área sob a curva tensão-deformação é baixa deduz-se que têm pouca tenacidade isto é a energia para quebrar uma unidade de volume de material é baixa. Os possíveis erros associados baseiam-se, principalmente, na existência de vazios, no trabalhoso controlo da espessura da placa, na difícil homogeneização e impregnação da resina da mesma forma em todas as placas e no controlo da pressão de aperto dos batentes. Paralelamente, o corte dos provetes pode não ter ocorrido com a mesma precisão em todas as placas.

4.2 Teste de Tração

A Figura 22 apresenta o gráfico força versus deslocamento para os três tipos de compósitos. A partir desta Figura, observa-se que nenhum material se sobressai em relação aos restantes.

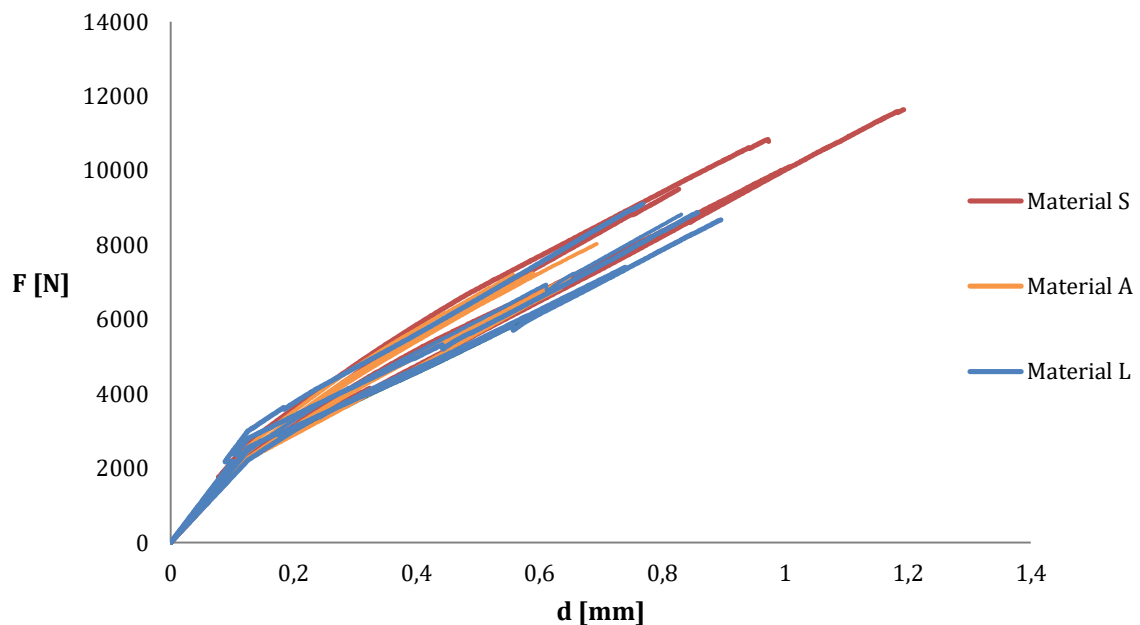


Figura 22 - Gráfico da força em função do deslocamento dos diferentes tipos de compósitos.

A Figura 23 apresenta o gráfico tensão versus deslocamento para os três tipos de compósitos. Verifica-se que ambos apresentam um comportamento bastante semelhante. Os materiais apresentam uma tensão de rotura que varia entre os 80 MPa e os 120 MPa.

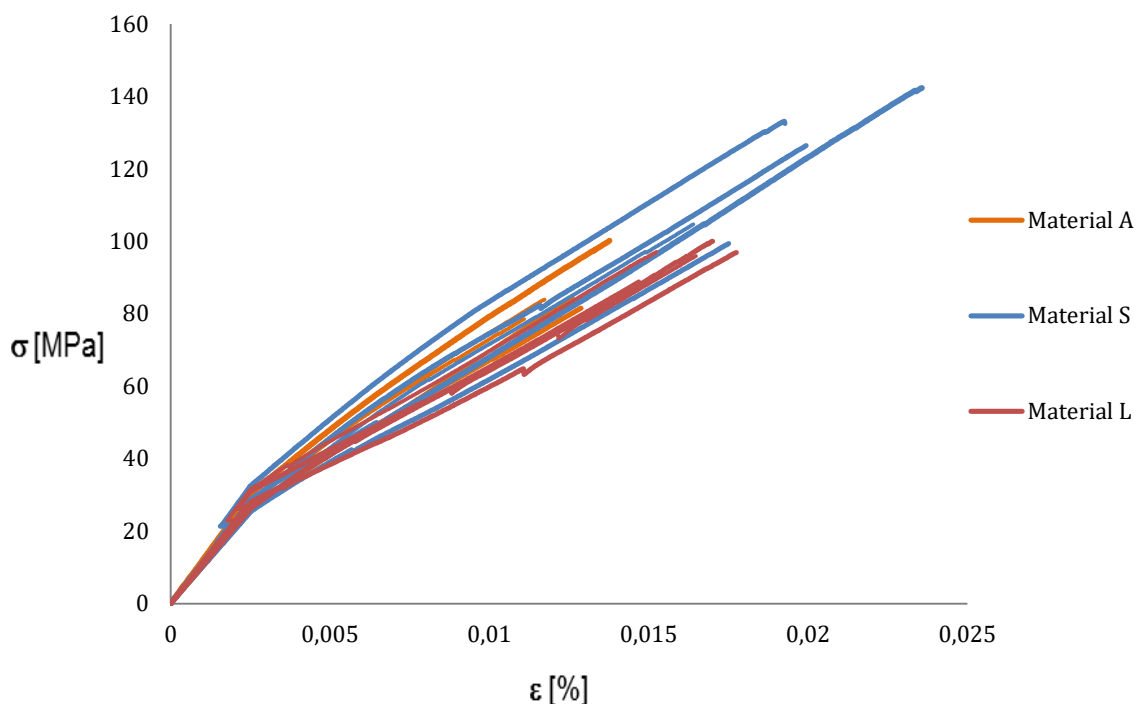


Figura 23 - Gráfico da tensão em função da deformação para os vários compósitos.

Os gráficos tensão *versus* deformação e força *versus* deslocamento, do teste de flexão, para cada material podem ser vistos com mais detalhe nos Anexos 4, 5 e 6.

Os resultados da média e desvio padrão das propriedades obtidos no ensaio encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4 - Propriedades mecânicas referentes ao teste de tração.

Propriedades	$F_{m\acute{a}x}$ (N)			σ_r (MPa)			ϵ_r (%)			E (GPa)		
Material	A	L	S	A	L	S	A	L	S	A	L	S
Média	7286	8576	10129	85	94	119	1,25	1,64	1,95	11,06	11,51	11,27
Desvio Padrão (%)	5,47	7,02	10,45	8,67	3,84	13,41	7,64	7,13	12,79	1,30	8,64	10,41

O modo de rotura dos provetes do material S e A ocorreu maioritariamente nos topos. Segundo a norma este tipo de rotura designa-se LAT (L - *lateral*; A - *at grip*, T - *top*). Apesar de a rotura não ter ocorrido no centro do provete, os resultados foram validados uma vez que os valores das tensões se encontram muito próximos uns dos outros.

Uma das principais causas da rotura ter ocorrido no topo prende-se como facto de não haver uma correta homogeneização da espessura ao longo da placa durante a laminagem manual bem como pequenas alterações de tamanho durante o corte.

Nos compósitos do tipo L a rotura deu-se no centro do provete denominando-se LGM (L - *lateral*, G - *gage*, M - *middle*).

Os resultados deste teste corroboram a hipótese efetuada no teste de flexão dos materiais serem frágeis, não dúcteis e pouco tenazes. Isto é, os compósitos fraturam com pouca deformação ($\epsilon_r < 5\%$) e a área sob o gráfico representado na Figura 23 é relativamente pequena.

Em relação aos módulos de elasticidade, os laminados com resina L sobressaem-se, ligeiramente, em relação aos restantes, o que vai de encontro ao resultado obtido no teste anterior.

Tal como no teste de flexão, os erros associados deparam-se sobretudo com a laminagem manual e o corte dos provetes.

Em relação ao teste de flexão, o ensaio de tração revela uma diminuição da rigidez ou seja módulos de elasticidade mais baixos, o que conduz a um comportamento elástico mais elevado. Esta diminuição de valor já era esperada pois, geralmente, a resistência à flexão de um material é, aproximadamente, 20 % a 50 % superior do que a resistência à tração.

4.3 Análise Dinâmico-Mecânica

Parte 1

Na Tabela 5, encontram-se os principais dados e resultados relativos à análise dinâmico-mecânica para os vários materiais compósitos.

Tabela 5 - Propriedades mecânicas referentes à análise dinâmico-mecânica da primeira parte.

Amostra	Largura (mm)	Espessura (mm)	Tg_1 (°C)	Tg_2 (°C)	E' (MPa)
A	11,88	2,94	72,90	144,56	3136
L	12,29	3,16	73,00	143,12	3691
S	12,18	2,99	76,00	145,14	3863

Na Figura 24 à 29 encontram-se os gráficos do ensaio de DMA realizado a cada amostra.

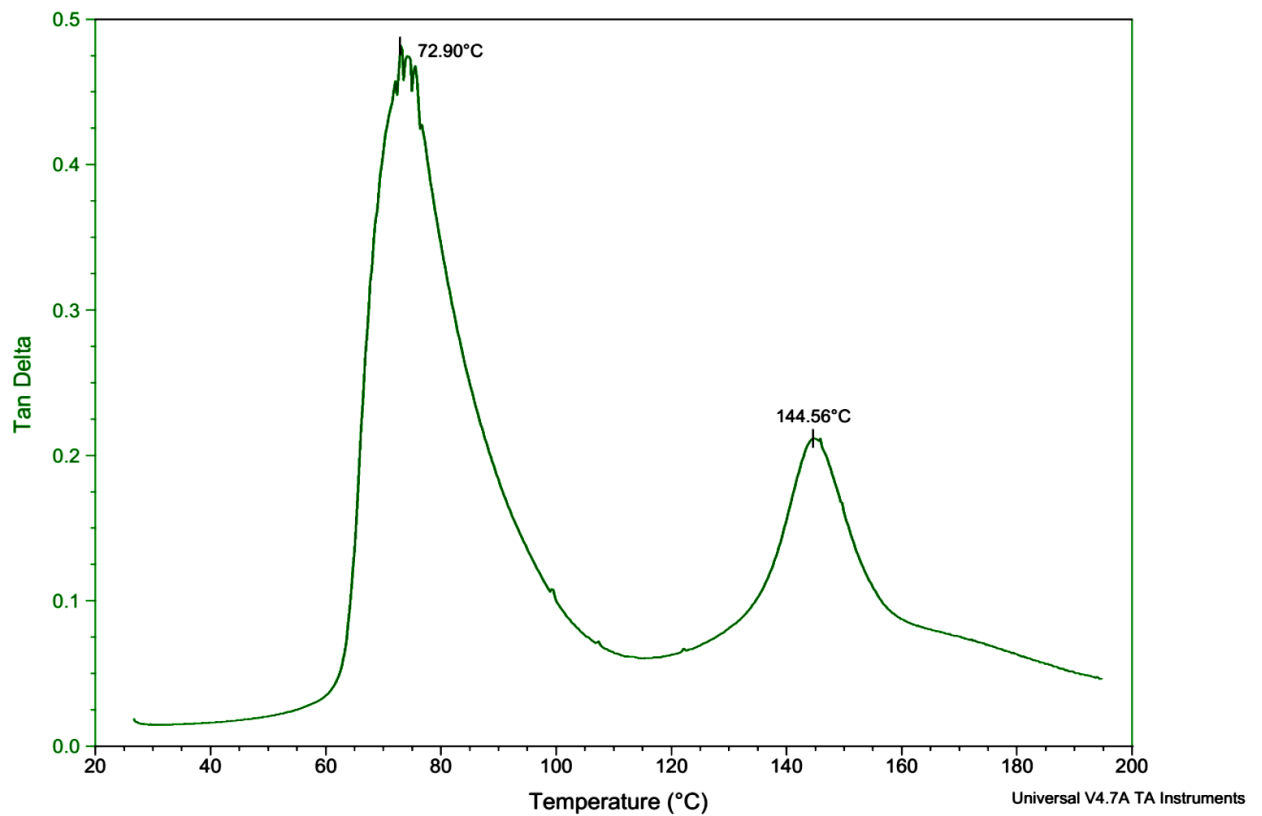


Figura 24 - Gráfico do ensaio de DMA da amostra A - Tg.

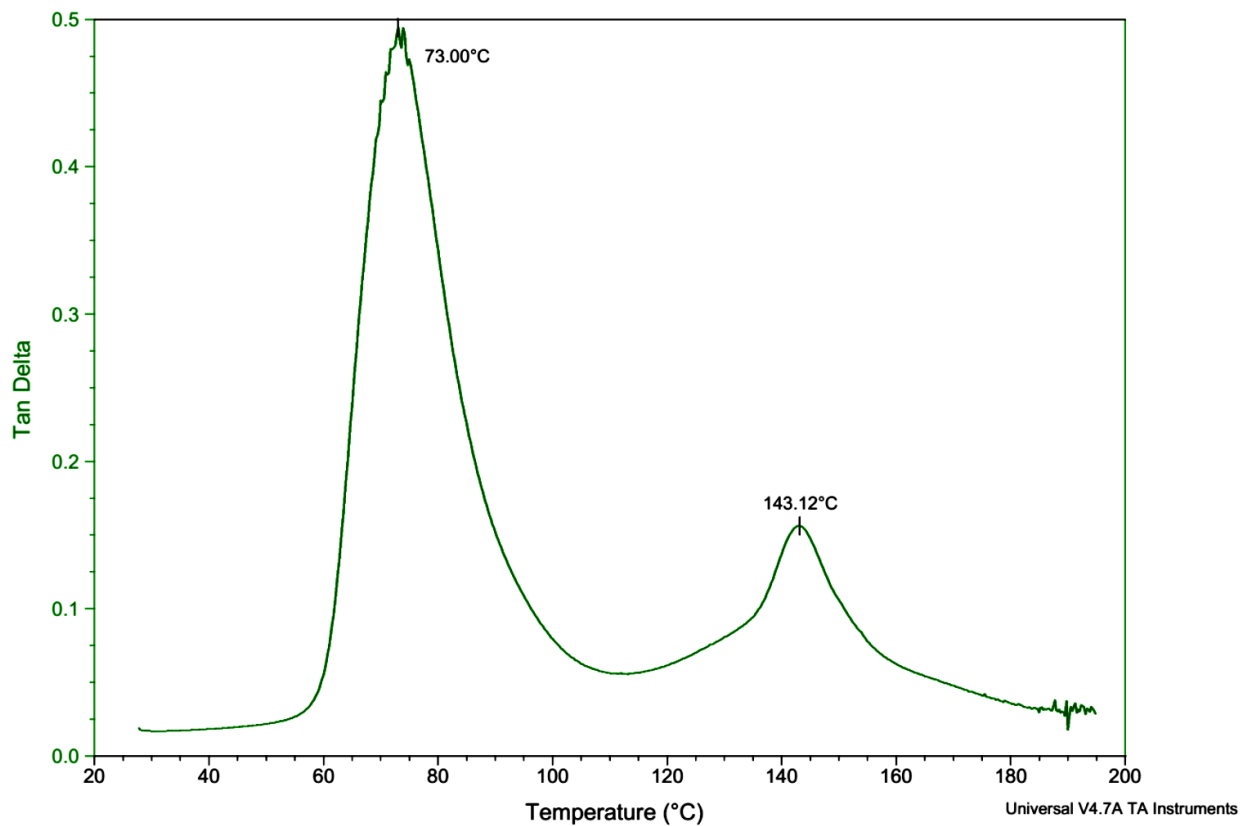


Figura 25 - Gráfico do ensaio de DMA da amostra L - Tg.

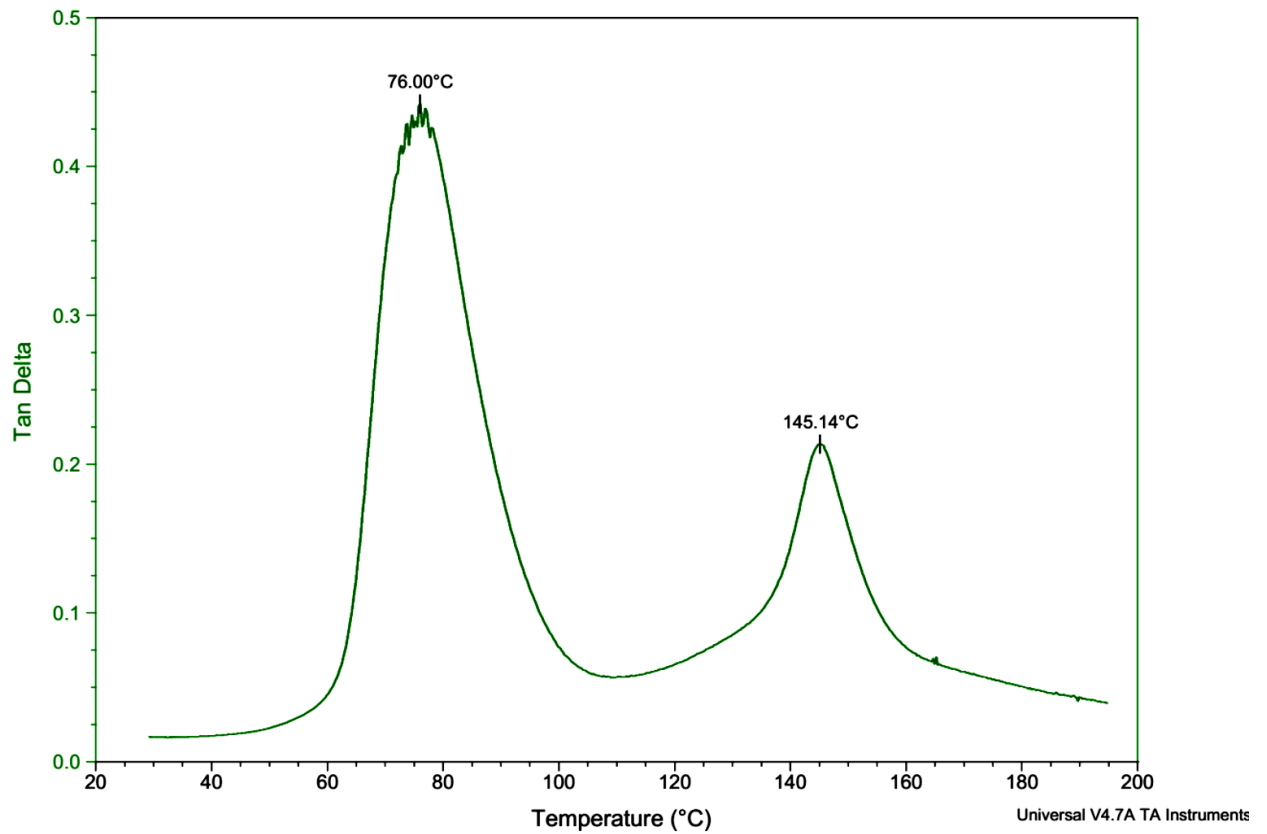


Figura 26 - Gráfico do ensaio de DMA da amostra S - Tg.

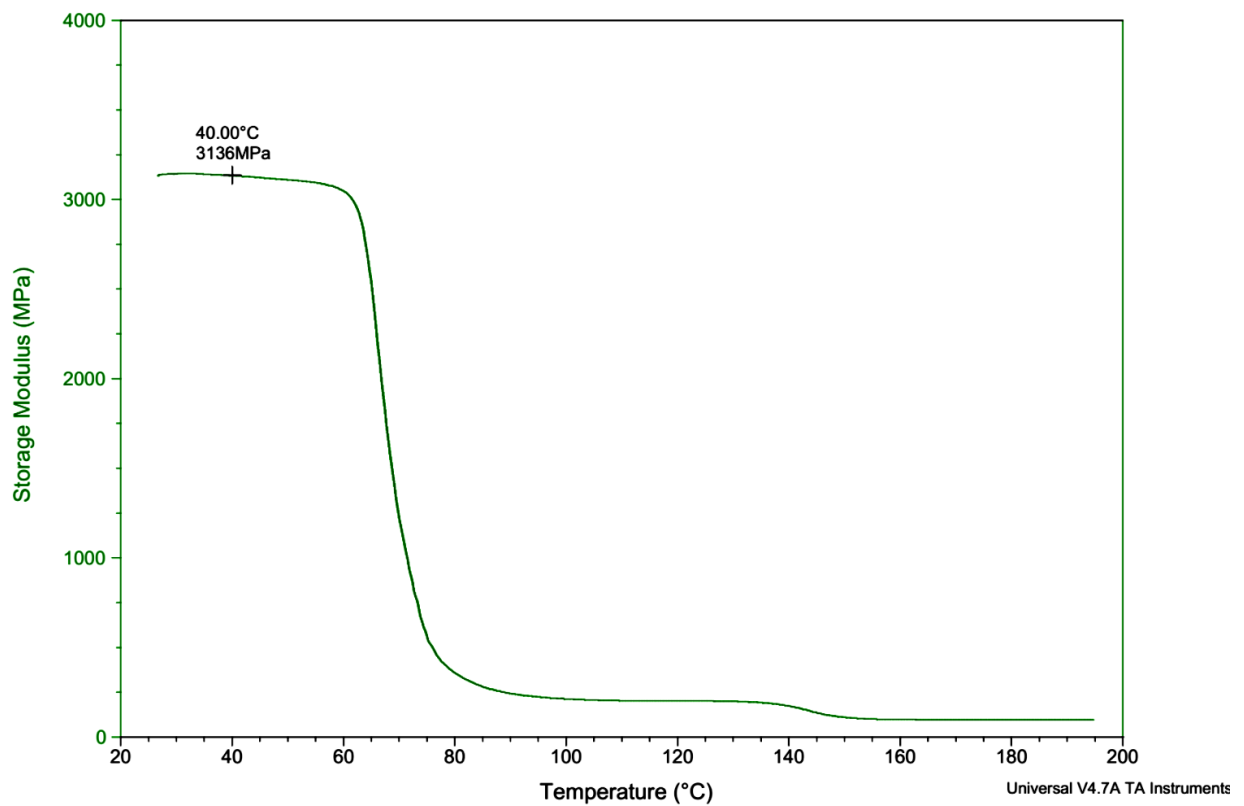


Figura 27 - Gráfico do ensaio de DMA da amostra A - E.

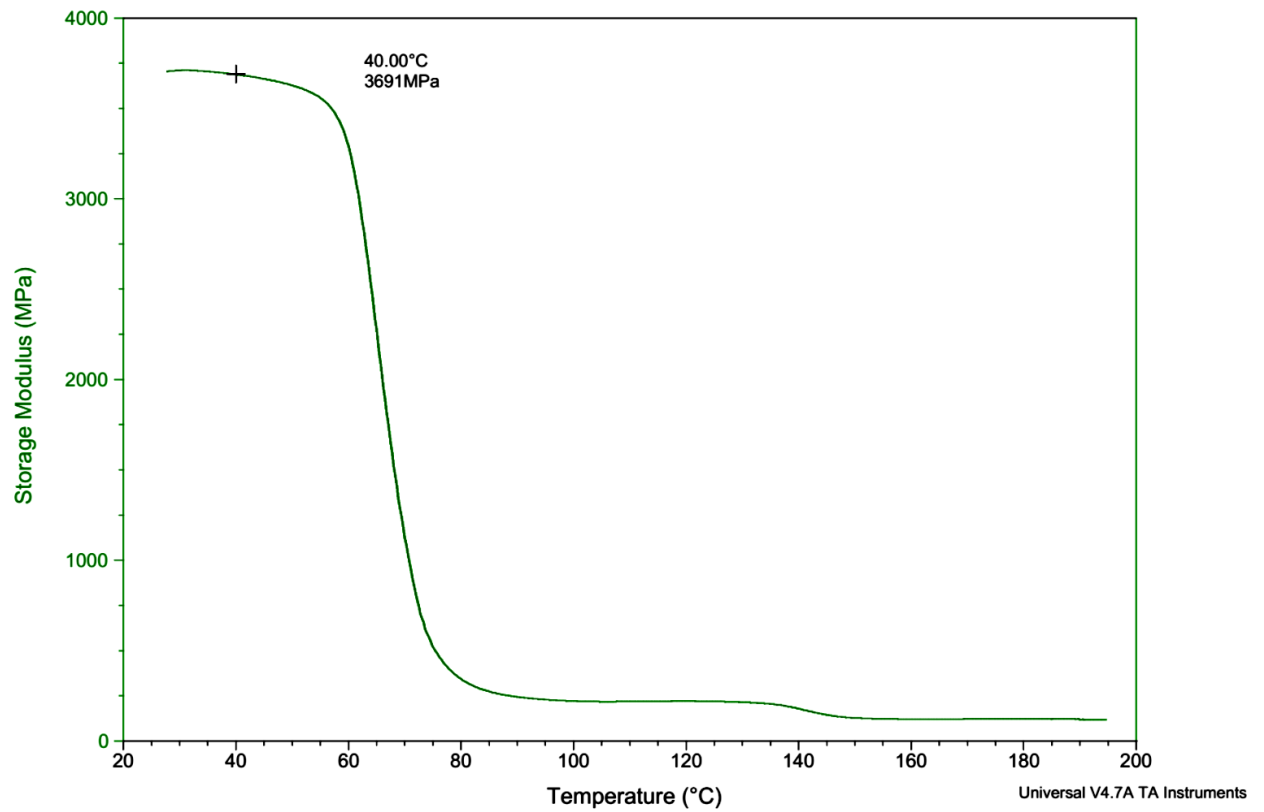


Figura 28 - Gráfico do ensaio de DMA da amostra L - E.

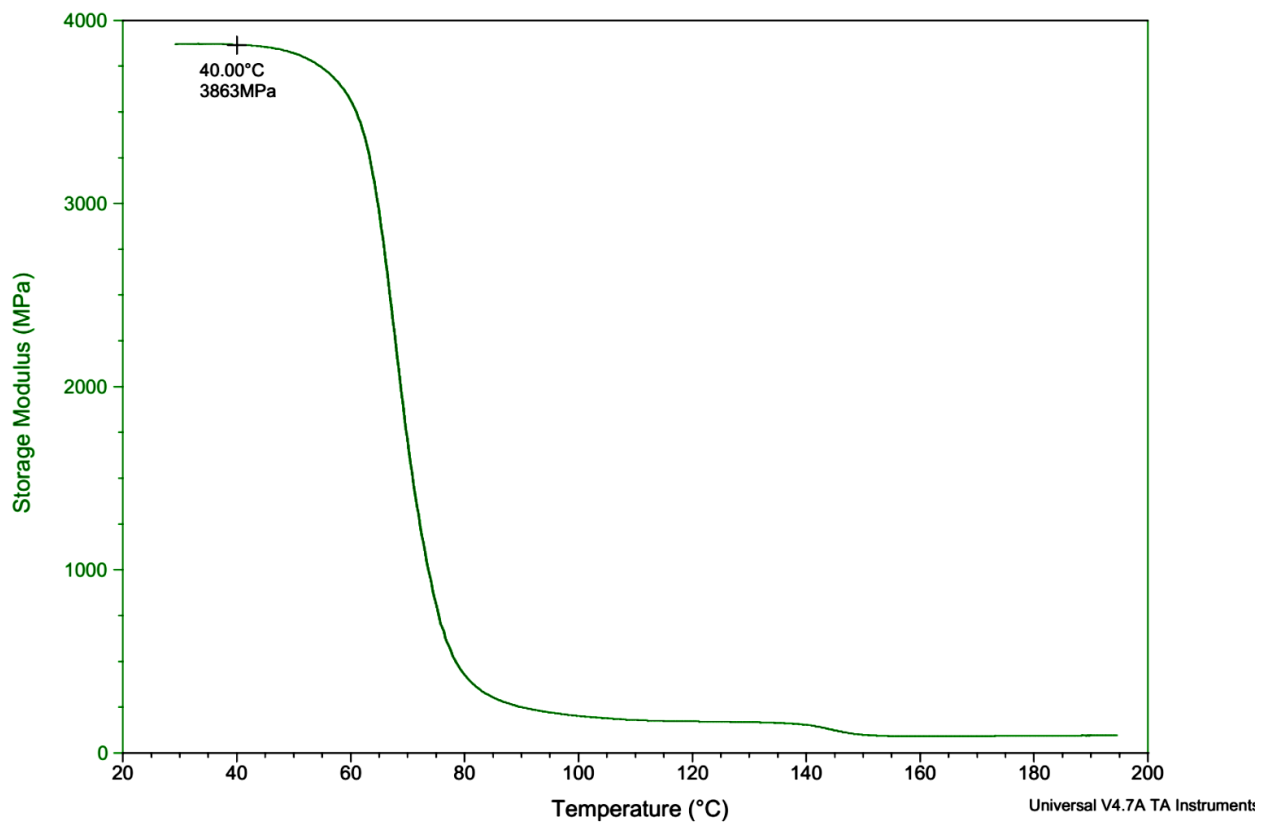


Figura 29 - Gráfico do ensaio de DMA da amostra S - E.

O módulo de elasticidade obtido para cada material não pode ser comparado com os dos testes de flexão e tração uma vez que este quando determinado pelo DMA é dinâmico e a tensão mecânica aplicada é oscilatória. Por sua vez, nos outros testes o módulo de elasticidade obtém-se através de um ensaio estático e cujo objetivo é analisar as propriedades limites do material.

Relativamente aos valores de E obtidos pelo DMA, verifica-se que o compósito constituído com resina S é o que manifesta mais resistência.

Analisando a Figura 24 à 26, observa-se a presença de dois picos. O primeiro pico está relacionado apenas com a matriz de epóxico e o segundo pico refere-se ao compósito. Assim, as temperaturas de transição vítrea das resinas rondam os 70 °C e as do compósito são superiores rondando os 145 °C.

Parte 2

Como os valores bastante idênticos entre os vários materiais encontrados anteriormente podiam dever-se aos elementos de reforço, realizaram-se testes de análise dinâmico-mecânica apenas às diferentes resinas.

Na Tabela 6, encontram-se os principais dados e resultados relativos aos ensaios da segunda parte.

Tabela 6 - Propriedades mecânicas referentes à análise dinâmico-mecânica da segunda parte.

Amostra	Largura (mm)	Espessura (mm)	T_g (°C)	E' (MPa)
Resina A	15,39	1,55	70,97	1909
Resina L	15,56	1,93	73,36	2115
Resina S	16,81	1,80	69,56	1971

Na Figura 30 à 32 encontram-se os gráficos do ensaio de DMA realizado a cada amostra.

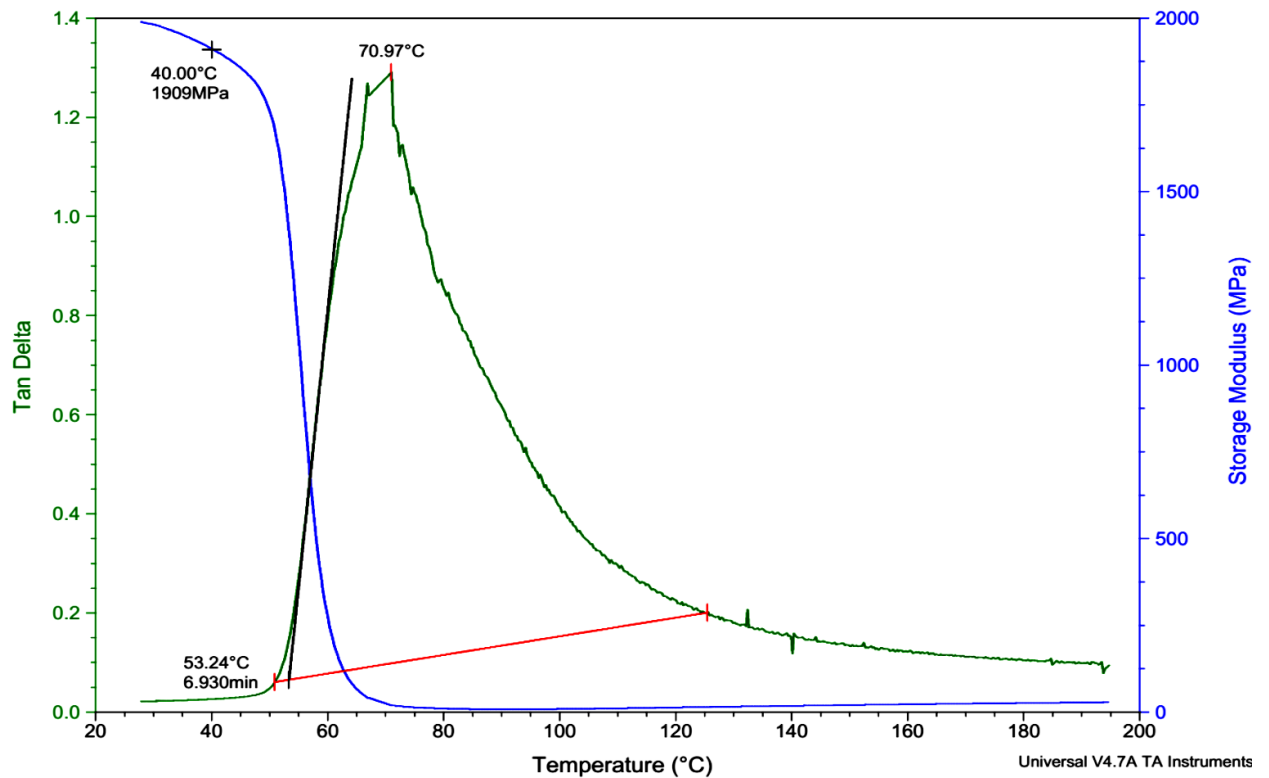


Figura 30 - Gráfico do ensaio de DMA da resina A - Tg e E.

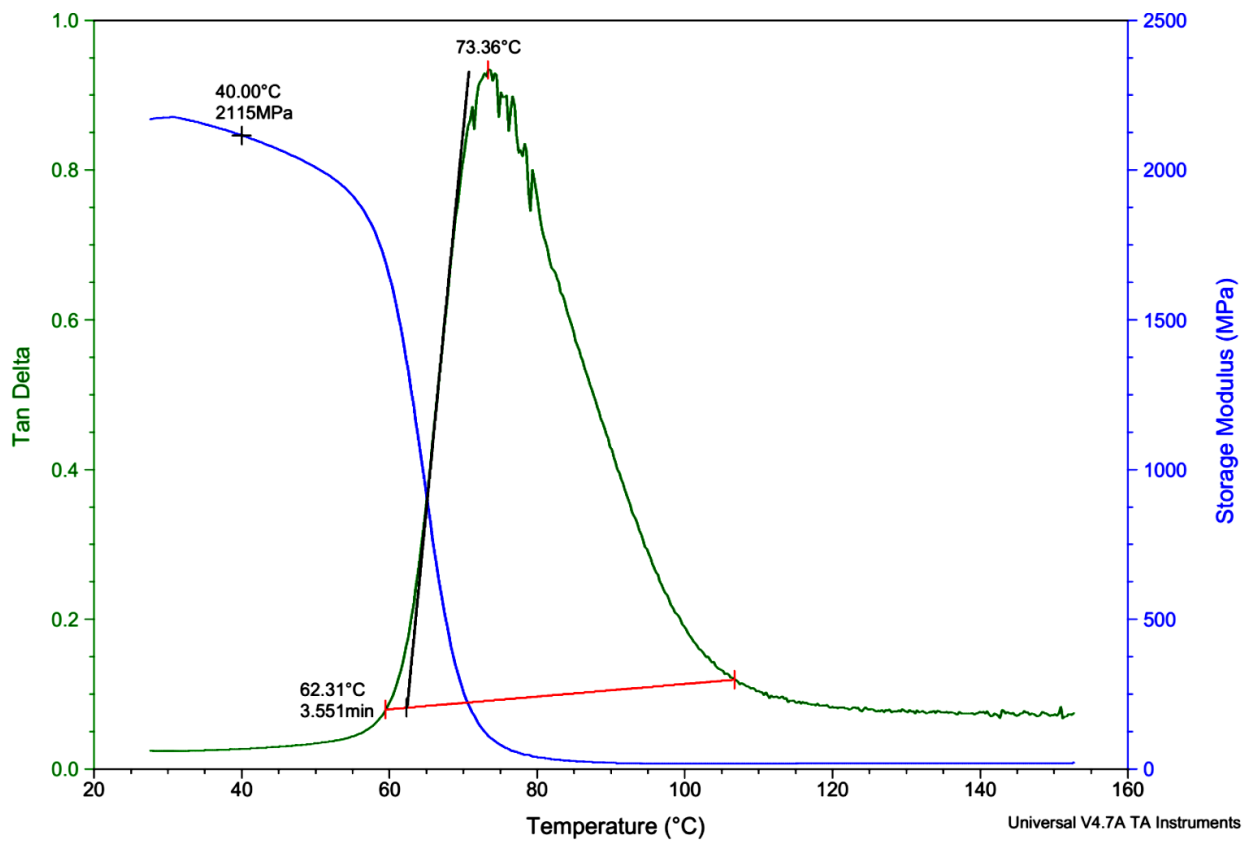


Figura 31 - Gráfico do ensaio de DMA da resina L - Tg e E.

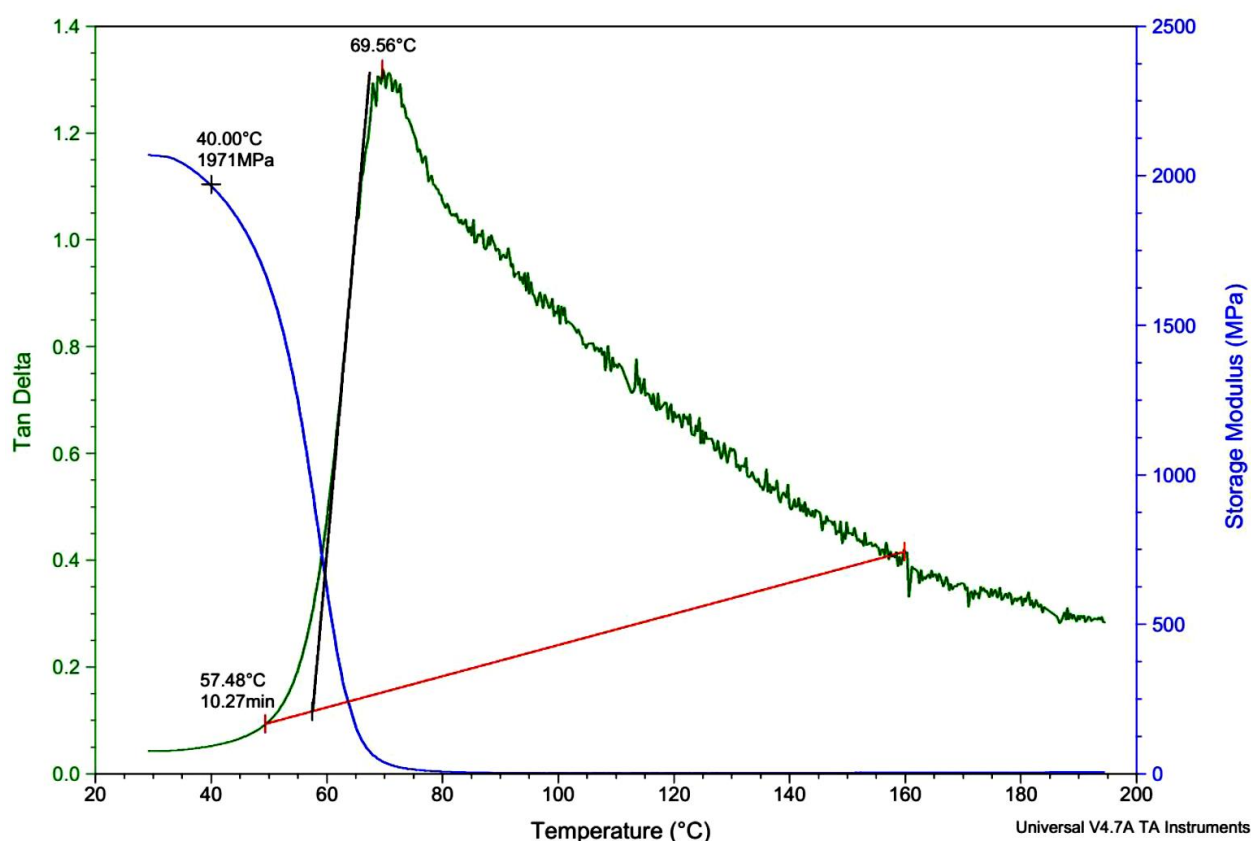


Figura 32 - Gráfico do ensaio de DMA da resina S - Tg e E.

Os resultados obtidos quer para a temperatura de transição vítrea quer para o módulo de elasticidade revelaram as semelhanças de valores entre as resinas. Assim, pode afirmar-se que os elementos de reforço não são os responsáveis pelos idênticos resultados ficando provada a verdadeira similaridade das resinas.

Comparando os módulos de armazenamento da parte 2 com os da parte 1, verifica-se que os elementos de reforço provocam um aumento do módulo de, aproximadamente, 1000 MPa, ou seja, 60 %. Esta diferença é importante pois garante a resistência associada aos compósitos e consequentemente às embarcações da empresa. Segundo estes resultados, a resina L é a que apresenta maior módulo de elasticidade e consequentemente maior resistência.

As temperaturas de transição vítrea obtidas vão de encontro às temperaturas do primeiro pico obtidas na primeira parte.

Os possíveis erros devem-se essencialmente aos erros associados à moldagem manual ou possíveis bolhas de ar que permaneceram nos compósitos, como já foi referido.

Os valores das temperaturas de transição vítrea e módulos de elasticidade não se encontravam nos dados fornecidos pelos fornecedores pelo que não foi possível comparar valores.

4.4 Análise de sensibilidade

Para verificar a influência da largura e da espessura das amostras no módulo de elasticidade no teste de flexão e no teste de tração representaram-se graficamente estas medidas, como se pode ver na Figura 33 à 36.

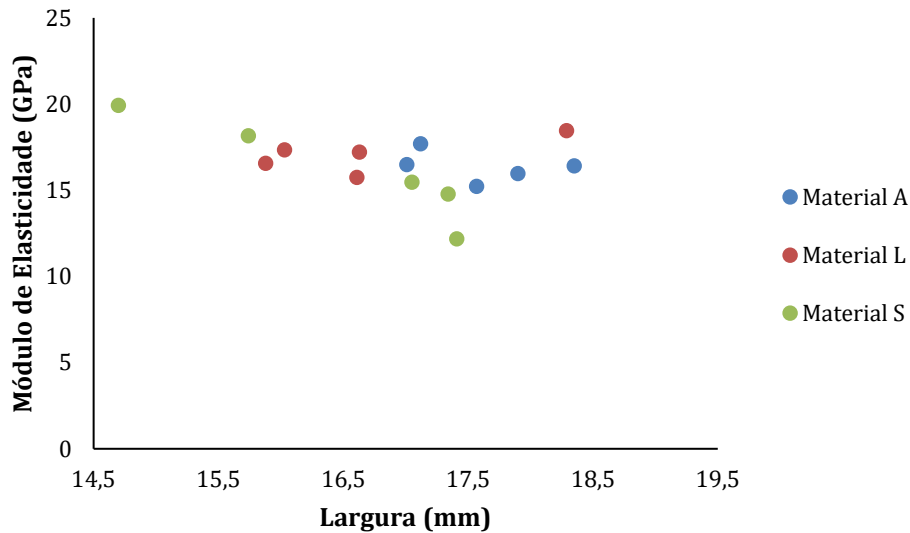


Figura 33 - Variação do módulo de elasticidade em função da largura dos provetes do teste de flexão.

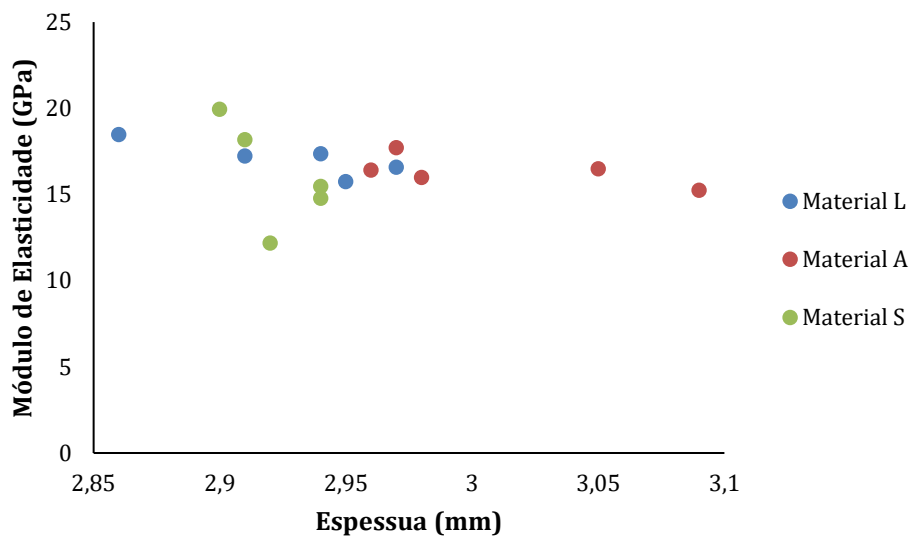


Figura 34 - Variação do módulo de elasticidade em função da espessura dos provetes do teste de flexão.

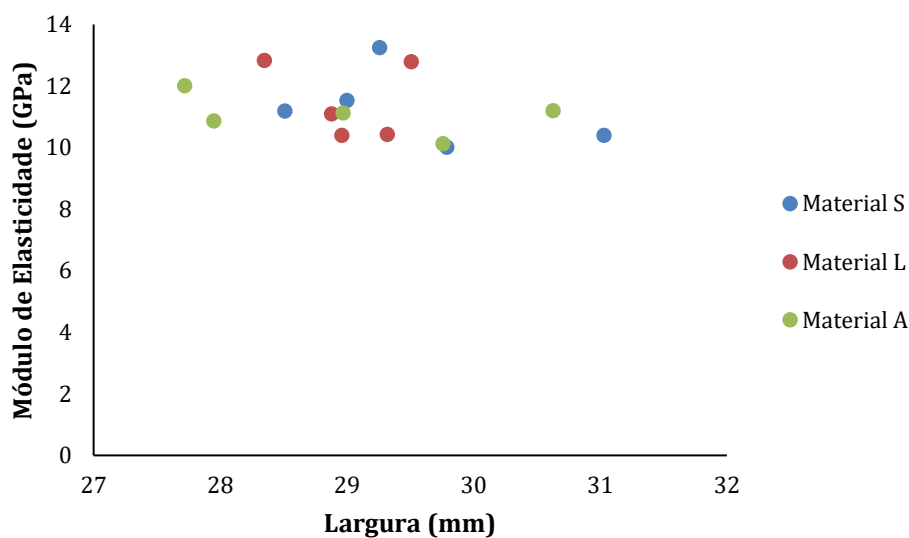


Figura 35 - Variação do módulo de elasticidade em função da largura dos provetes do teste de tração.

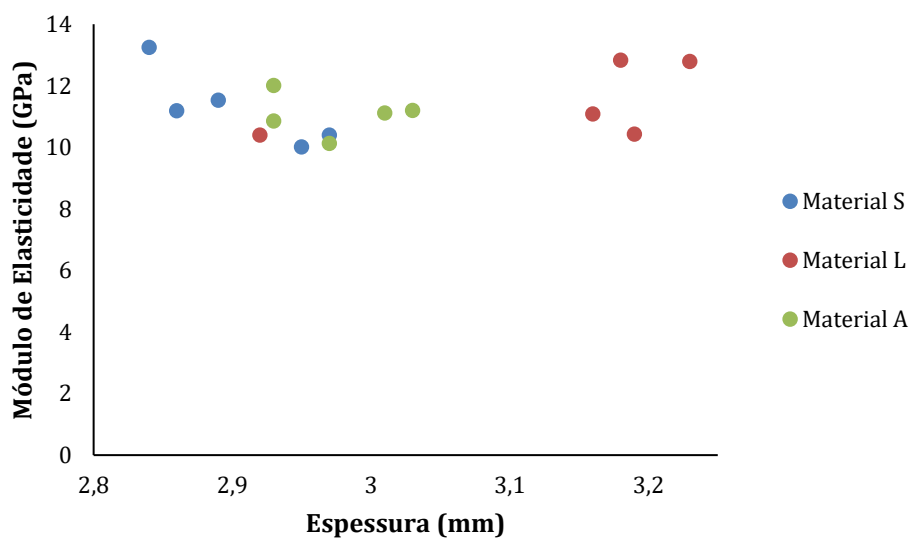


Figura 36 - Variação do módulo de elasticidade em função da espessura dos provetes do teste de tração.

Como se pode verificar nas figuras anteriores, as ligeiras discrepâncias nos valores dos módulos de elasticidade não podem ser justificadas pela largura ou espessura dos provetes uma vez que essas diferenças não são suficientemente elevadas. Assim, pode dizer-se que os principais erros devem-se mesmo a bolhas de ar e mau espalhamento da resina.

5 Conclusões

Os materiais compósitos são cada vez mais utilizados nas várias indústrias devido às suas excelentes propriedades mecânicas.

Neste trabalho elaboraram-se por laminagem manual três materiais compósitos diferentes, isto é, todos com o mesmo elemento de reforço mas matrizes diferentes. Com o objetivo de caracterizar e avaliar as propriedades mecânicas dos compósitos realizaram-se testes de flexão, tração e uma análise dinâmico-mecânica.

No teste de flexão e no de tração verificou-se que a resina L apresenta uma ligeira superioridade no módulo de elasticidade. Assim, nestes testes pode ser considerada a mais resistente. Os outros dois compósitos apresentam resultados bastante idênticos.

Na análise dinâmico-mecânica aos compósitos a resina S revelou ser a mais resistente tendo um módulo de elasticidade bastante superior aos outros dois materiais. Numa segunda análise por DMA, analisaram-se apenas as resinas tendo sido a resina L, novamente, a que apresentou um superior módulo de armazenamento.

O módulo de elasticidade na primeira parte do ensaio de DMA assumiu valores bastante superiores, cerca de 60 %, aos da última parte salientando-se, então, o contributo dos elementos de reforço na resistência. Os valores do módulo obtidos no DMA não podem ser comparados com os do teste de tração e flexão porque o teste no DMA é um teste oscilatório e não estático.

Tendo em conta que em quase todos os testes os compósitos do tipo L eram os mais resistentes pode-se considerar que o primeiro teste na análise dinâmico mecânico pode ter sido afetado por erros ocorridos na laminagem manual nomeadamente bolhas de ar.

Relativamente às temperaturas de transição vítrea, os valores encontrados foram todos bastante próximos uns dos outros. A temperatura de transição vítrea das resinas ronda os 70 °C e dos compósitos é cerca de 145 °C.

Apesar de a resina L parecer ser a melhor opção em termos de resistência, os outros materiais são também bastante resistentes uma vez que não houve uma grande discrepância de valores entres todos os compósitos.

Em termos de viscosidades, de acordo com os dados dos fornecedores, a resina S é a que apresenta menor viscosidade e a diferença entre as outras viscosidades é bastante notória.

O preço, normalmente, é um fator muito importante na escolha de uma matéria-prima. No entanto, o custo destas resinas não difere muito.

Concluindo, o principal fator que diferencia as resinas é a sua viscosidade pois tanto o preço como os módulos de elasticidade são bastante idênticos. Assim, torna-se mais fácil trabalhar durante a laminagem manual com uma resina menos viscosa sendo, portanto, a resina S a mais aconselhável.

5.1 Limitações e Trabalho Futuro

Uma das principais limitações deste trabalho foi a laminagem manual uma vez que se tornou muito complicado reproduzir amostras exatamente iguais. Para além disso, os resultados obtidos foram muito semelhantes pelo que na discussão de resultados houve uma dificuldade extra.

No futuro, propõem-se o estudo da incorporação de nanotubos de carbono ou outro tipo de carga na resina epóxi com o intuito de aumentar as propriedades dos compósitos. Para além disso, propõem-se o estudo de materiais compósitos com outros tipos de reforço para ver quais os que apresentam melhores propriedades.

Os compósitos são materiais bastante suscetíveis ao calor e à humidade pelo que se poderia estudar a influência destes dois fatores na resistência mecânica, térmica e de degradação.

5.2 Apreciação Final

A realização deste trabalho representou para mim um enorme desafio. Este trabalho permitiu-me o contacto com a indústria e com o mundo real do trabalho bem como concedeu-me uma vasta aprendizagem.

6 Referências

- [1] Campos, André António Rodrigues. *Estudo dos Efeitos Ambientais no Comportamento Mecânico de Materiais Compósitos*. Diss. Universidade da Beira Interior, 2012.
- [2] Tim Palucka, and Bernadette Bensaude-Vincent. *Composites Overview*. History of Recent Science and Technology. Web.
<http://authors.library.caltech.edu/5456/1/hrst.mit.edu/hrs/materials/public/composites/Composites_Overview.htm> (acedido a 2 de maio de 2017)
- [3] Milberg, Evan. *State of the Composites Industry - 2016*. Composites Manufacturing Magazine. Web. <<http://compositesmanufacturingmagazine.com/2016/01/state-of-the-composites-industry-lucintel-2016/2/>> (acedido a 2 de maio de 2017)
- [4] *Canoas E Caiaques: Quais São as Diferenças?* Webventure - A Vida Ao Ar Livre. Web.
<<http://www.webventure.com.br/h/noticias/canoas-e-caiaques-quais-sao-as-diferencas/32724>> (acedido a 2 de maio de 2017)
- [5] Duro, Ana Catarina Ferreira Murça. *Desenvolvimento E Caracterização De Compósitos Reforçados Com Fibras De Linho E Sisal*. Diss. Universidade Do Minho, 2013.
- [6] MG, MJC. *Fabrico de compósitos de matriz polimérica*. Escola Superior Tecnologia de Setúbal. Departamento de Engenharia Mecânica. 2005-2006.
- [7] Muhammad Oan. Industrial application of composites. Web.
<<http://pt.slideshare.net/OanSehto/applications-of-composite-polymers-by-oan>> (acedido a 2 de maio de 2017)
- [8] Preto, Rafael António Martins. *Estudo experimental do comportamento mecânico de compósitos em fibras de basalto*. Diss. Técnico Lisboa, 2013.
- [9] *Materiais Compósitos*. Apontamentos das aulas Química Geral, IST, Departamento de Engenharia Mecânica.
- [10] Compósitos de matriz metálica. Aplicações dos compósitos de matriz metálica, Publicado a 25 de Junho de 2012. Web.
<<https://compositosmetalicos.wordpress.com/2012/06/25/aplicacoes-dos-compositos-com-matriz-metalica/>> (acedido a 2 de maio de 2017)
- [11] Castro, Bruno Francisco. *Estudo e caracterização mecânica de compósitos reforçados com fibras naturais*. Diss. Instituto Superior Técnico do Porto, Julho de 2013.

- [12] COSTA, Fernando Mustafá. *Construção, reparo, conservação, manutenção e navegação em embarcações*. Universidade de São Paulo, 2012.
- [13] Jin, F.-L, X. Li e S.-J. Park, Synthesis and application of epoxy resins: A review Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2015.
- [14] Ebewele, Robert O. *Polymer Science and Technology*. 3rd ed. Florida: CRC Press LCC, 2000.
- [15] Silva, Henrique Pereira. *Comportamento mecânico de compósitos de fibra de vidro/epóxi nano-reforçados*. Diss. Universidade de Coimbra. Julho de 2014.
- [16] Thacker, Dave. *Composites & Carbon Rod Radical RC*. Web.
<http://www.radicalrc.com/category/Composites--Carbon-Rod-371> (acedido a 2 de maio de 2017).
- [17] Capella M. C., Soufen C. A., Correia G. V., Grizola O. S., Pintão C. A. F., Imaizumi M. *Propriedades Mecânicas em Laminados Fibras de Vidro e Fibras de Carbono em Resina Epóxi*, 2012.
- [18] Nasseh, Jorge. *Barcos - Métodos Avançados de Construção em Composites*. Rio de Janeiro, 2007.
- [19] Beber, Andriei José. *Comportamento Estrutural de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Compósitos de Fibra de Carbono*. Diss. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Julho de 2003.
- [20] Einborn, Ben. *Carbon Fiber- All Patterns Explained*. Carbon.ee. Web.
<<http://www.carbon.ee/en/n/carbon-fiber-all-patterns-explained>> (acedido a 2 de maio de 2017)
- [21] Galli, Cecilia Antunes. *Caracterização das Propriedades Mecânicas de Compósitos de Matriz de Epóxi com Fibras de Carbono Unidirecionais*. Diss. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Março de 2016.
- [22] Othmer, D.F. and J.I. Kroschwitz, Kirk-Othmer encyclopedia of chemical technology. 5th ed. 2004, Hoboken, N.J.: J. Wiley.
- [23] Chawla, Krishan K. *Processing of Thermoset Matrix Composites*. Composite Material. Science and Engineering. 3ªedição.
- [24] Franco Sousa, Rodrigo. *Produção de Componentes em Materiais Compósitos por Infusão de Resina*. Diss. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa. Dezembro 2008.

Anexo 1

Resultados da caracterização de compósitos do material A no teste de flexão

➤ Propriedades mecânicas à flexão

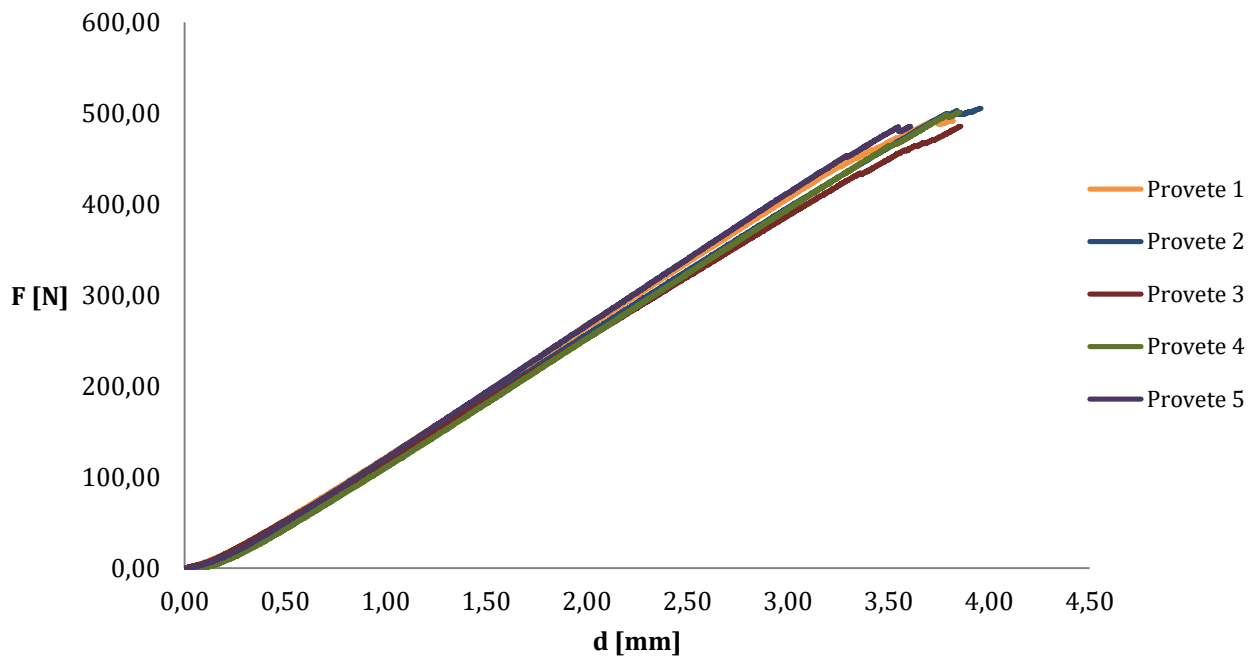


Figura 37 - Gráfico da força em função do deslocamento para os provetes do tipo A no ensaio de flexão.

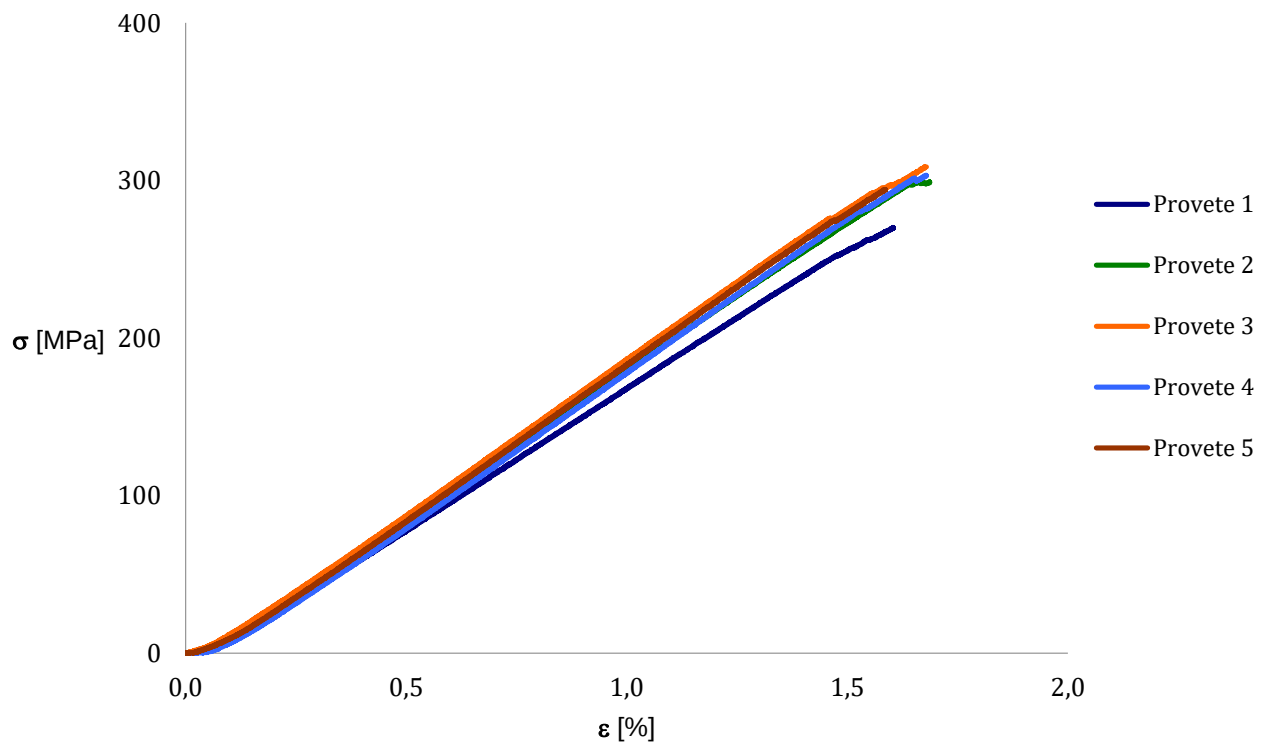


Figura 38 - Gráfico da tensão em função da deformação dos provetes do tipo A no teste de flexão.

➤ Dados e resultados experimentais

Tabela 7 - Dados e resultados experimentais dos provetes do tipo A no ensaio de flexão.

Proвете	Largura (mm)	Espessura (mm)	Tensão de rotura (MPa)	Deformação à rotura (%)	Módulo de elasticidade (GPa)
1	17,57	3,09	280,97	1,89	15,23
2	18,35	2,96	301,64	1,80	16,41
3	17,12	2,97	308,73	1,81	17,70
4	17,90	2,98	303,43	1,90	15,97
5	17,01	3,05	294,62	1,63	16,48

Anexo 2

Resultados da caracterização de compósitos do material L no teste de flexão

➤ Propriedades mecânicas à flexão

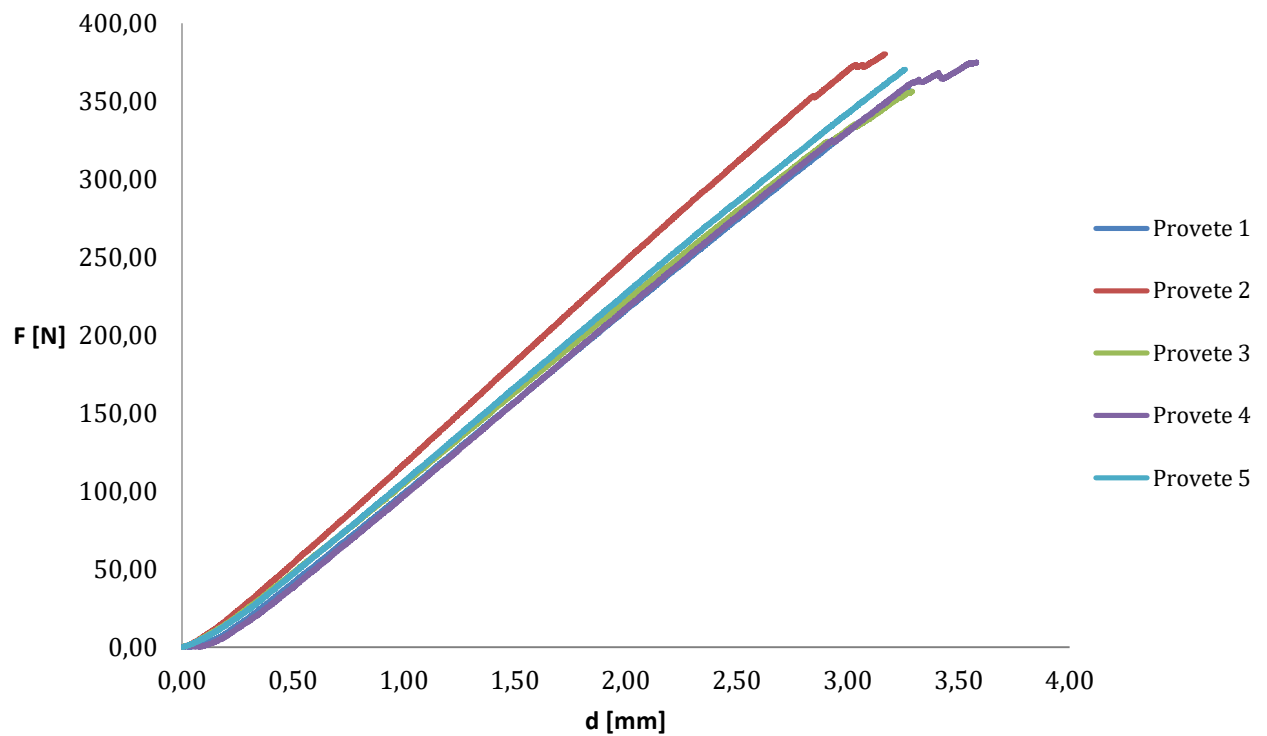


Figura 39 - Gráfico da força em função do deslocamento para os provetes do tipo L no ensaio de flexão.

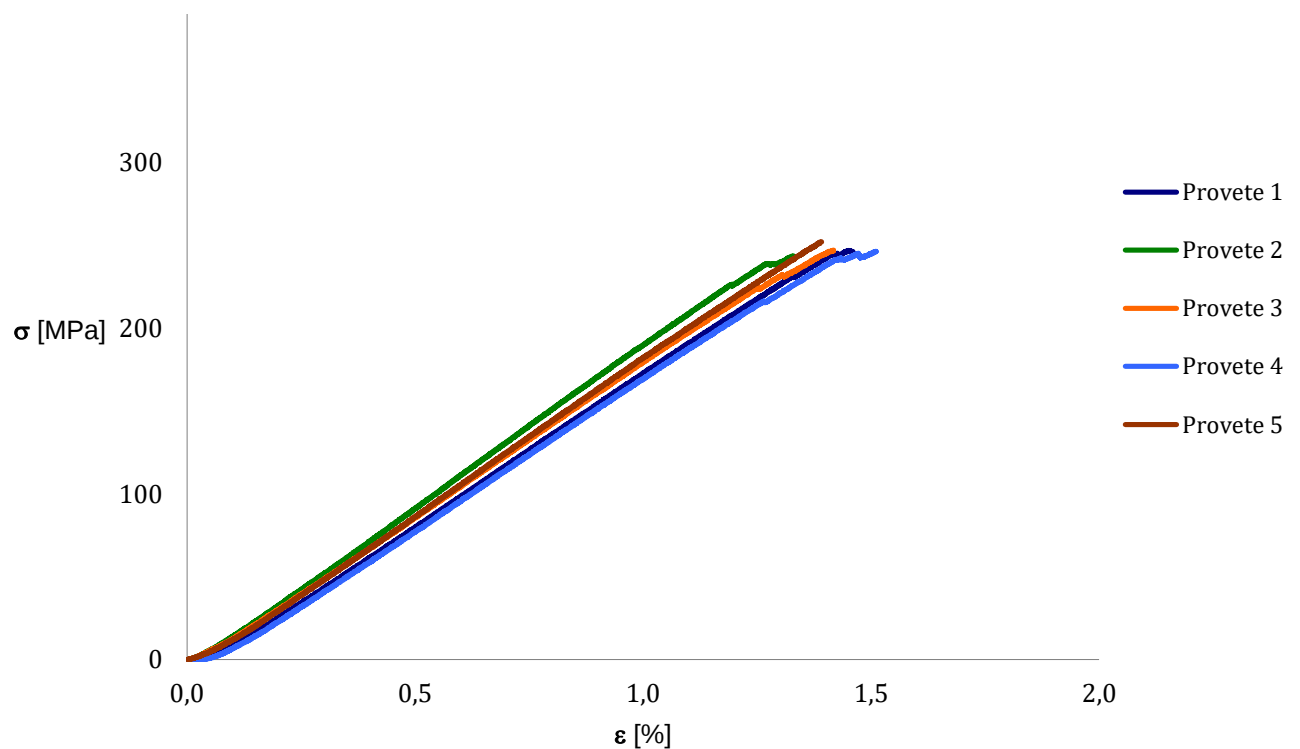


Figura 40 - Gráfico da tensão em função da deformação dos provetes do tipo L no teste de flexão.

➤ *Dados e resultados experimentais**Tabela 8 - Dados e resultados experimentais dos provetes do tipo L no ensaio de flexão.*

Proвете	Largura (mm)	Espessura (mm)	Tensão de rotura (MPa)	Deformação à rotura (%)	Módulo de elasticidade (GPa)
1	15,88	2,97	246,75	1,48	16,57
2	18,29	2,86	243,47	1,41	18,46
3	16,03	2,94	246,95	1,43	17,35
4	16,61	2,95	249,69	1,55	15,74
5	16,63	2,91	252,01	1,57	17,22

Anexo 3

Resultados da caracterização de compósitos do material S no teste de flexão

➤ Propriedades mecânicas à flexão

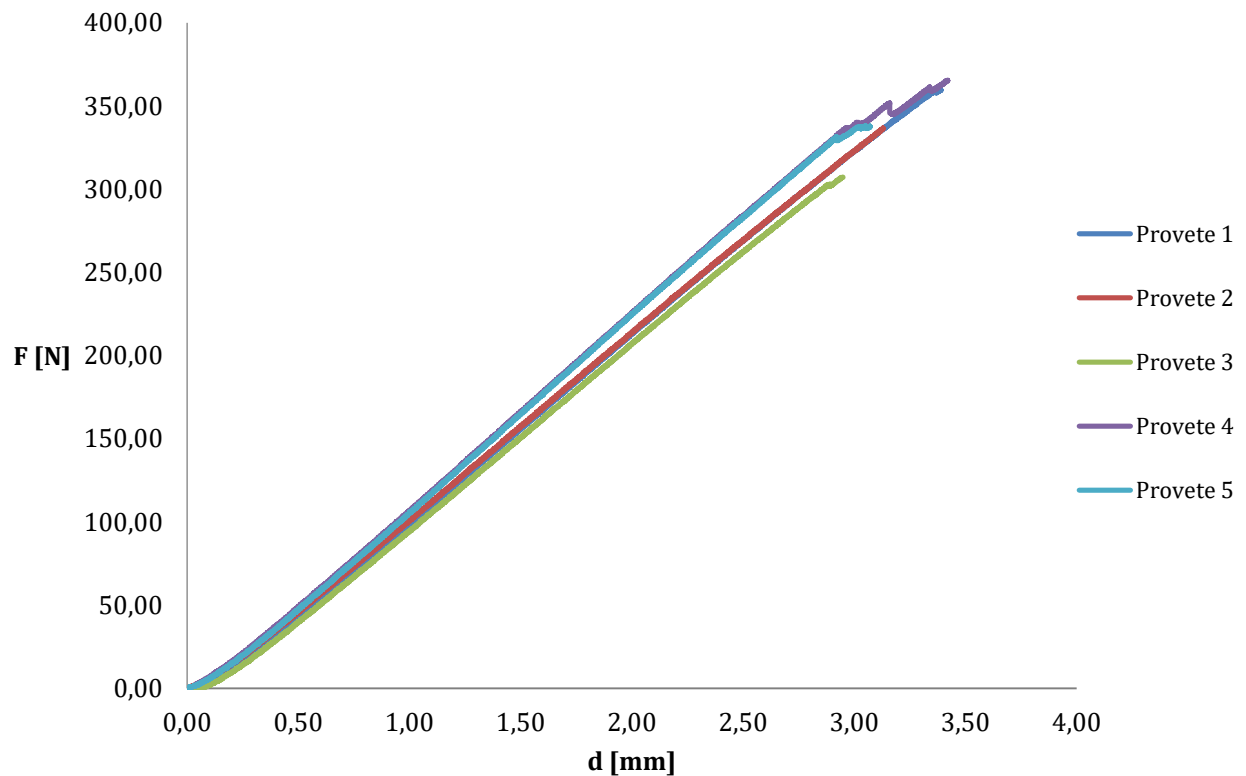


Figura 41 - Gráfico da força em função do deslocamento para os provetes do tipo S no ensaio de flexão.

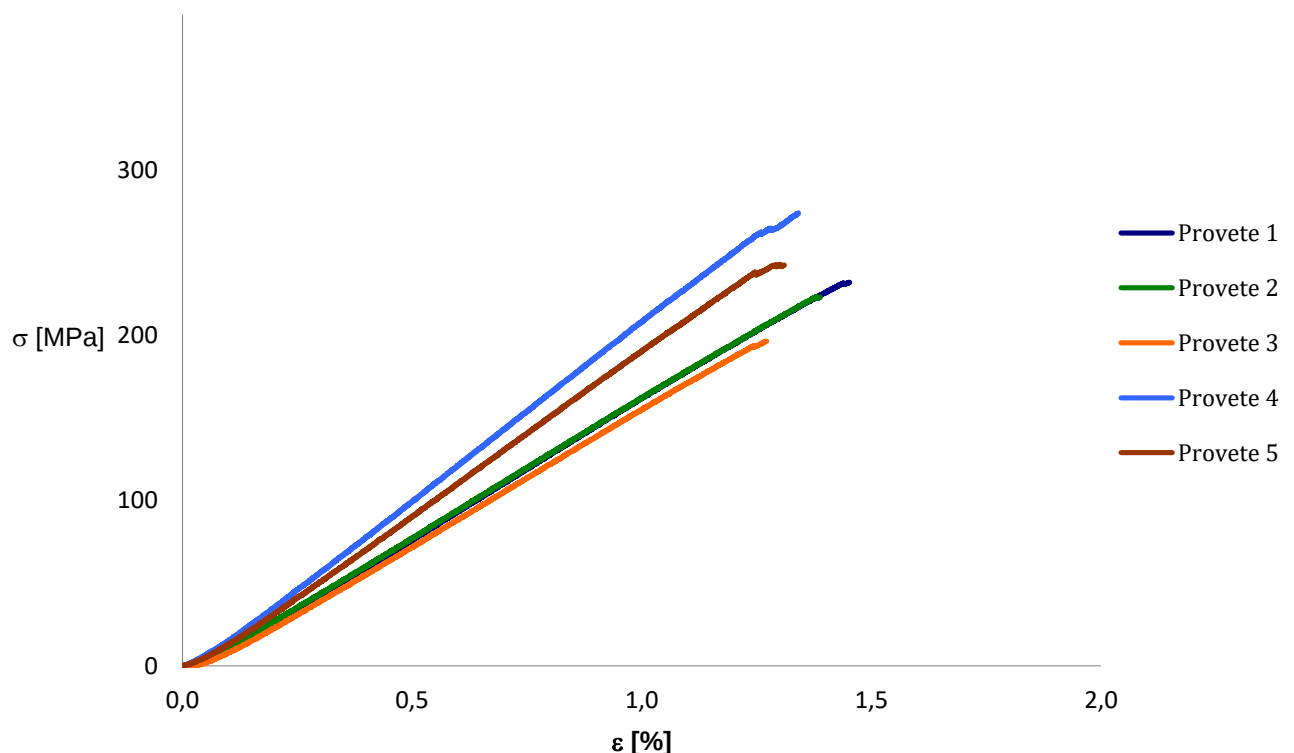


Figura 42 - Gráfico da tensão em função da deformação dos provetes do tipo S no teste de flexão.

➤ Dados e resultados experimentais

Tabela 9 - Dados e resultados experimentais dos provetes do tipo S no ensaio de flexão.

Proвете	Largura (mm)	Espessura (mm)	Tensão de rotura (MPa)	Deformação à rotura (%)	Módulo de elasticidade (GPa)
1	17,41	2,92	232,01	1,46	12,17
2	17,05	2,94	223,92	1,44	15,46
3	17,34	2,94	196,35	1,28	14,77
4	14,70	2,90	284,61	1,48	19,93
5	15,74	2,91	244,82	1,42	18,16

Anexo 4

Resultados da caracterização de compósitos do material S no teste de tração

➤ Propriedades mecânicas à tração

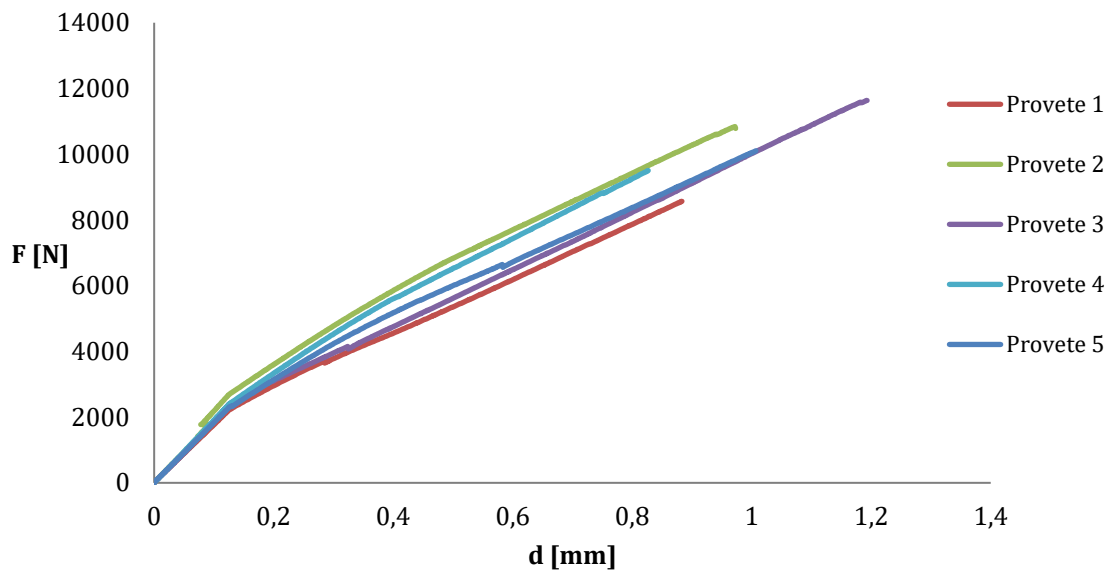


Figura 43 - Gráfico da força em função do deslocamento dos provetes do tipo S no ensaio de tração.

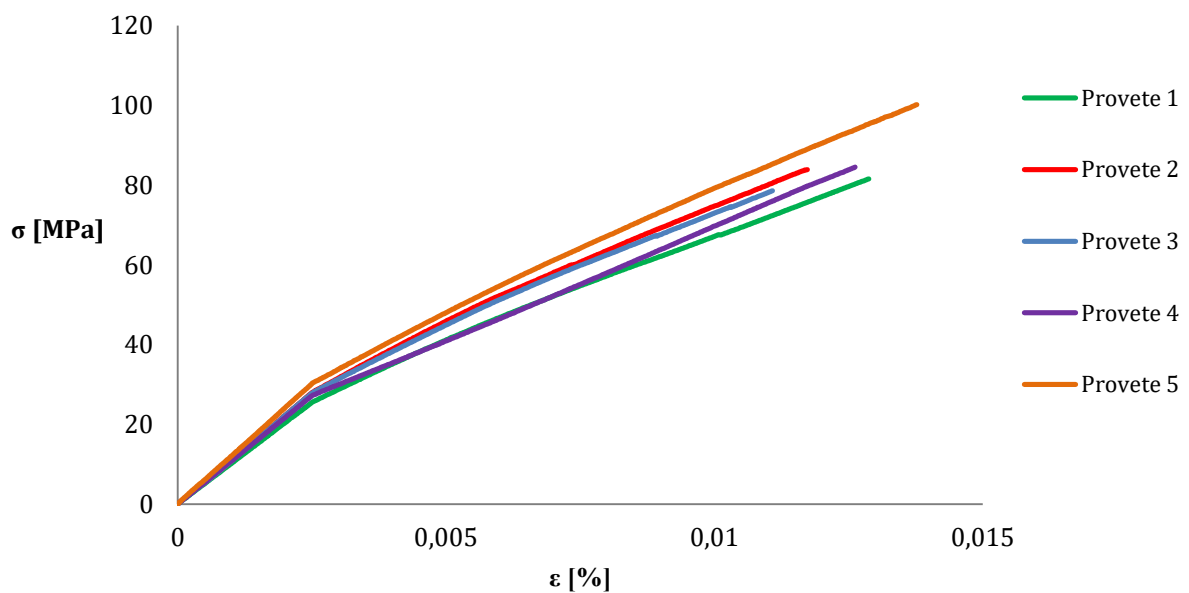


Figura 44 - Gráfico da tensão em função da deformação dos provetes do tipo S no teste de tração.

➤ Dados e resultados experimentais

Tabela 10 - Dados e resultados experimentais dos provetes do tipo S no ensaio de tração.

Proвете	Largura (mm)	Espessura (mm)	Tensão de rotura (MPa)	Deformação à rotura (%)	Módulo de elasticidade (GPa)
1	29,79	2,95	97,65	1,77	10,01
2	29,26	2,84	130,61	1,94	13,25
3	29,00	2,89	138,97	2,38	11,53
4	31,03	2,97	102,99	1,65	10,40
5	28,51	2,86	123,93	2,01	11,19

Anexo 5

Resultados da caracterização de compósitos do material L no teste de tração

➤ Propriedades mecânicas à tração

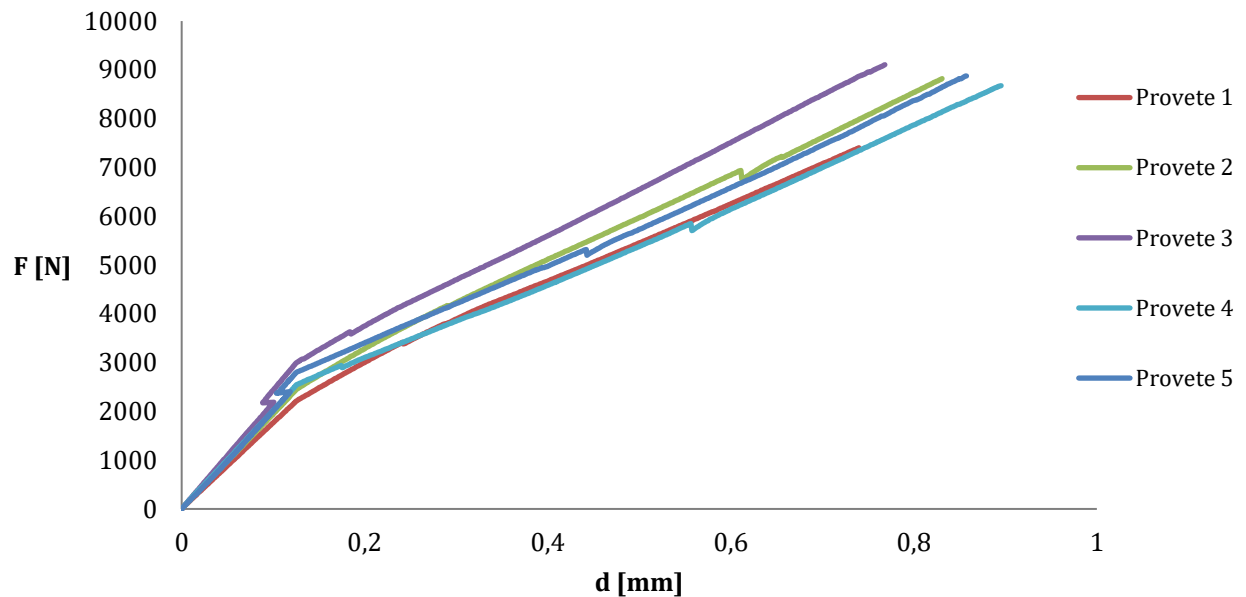


Figura 45 - Gráfico da tensão em função do deslocamento para os provetes do tipo L no ensaio de tração.

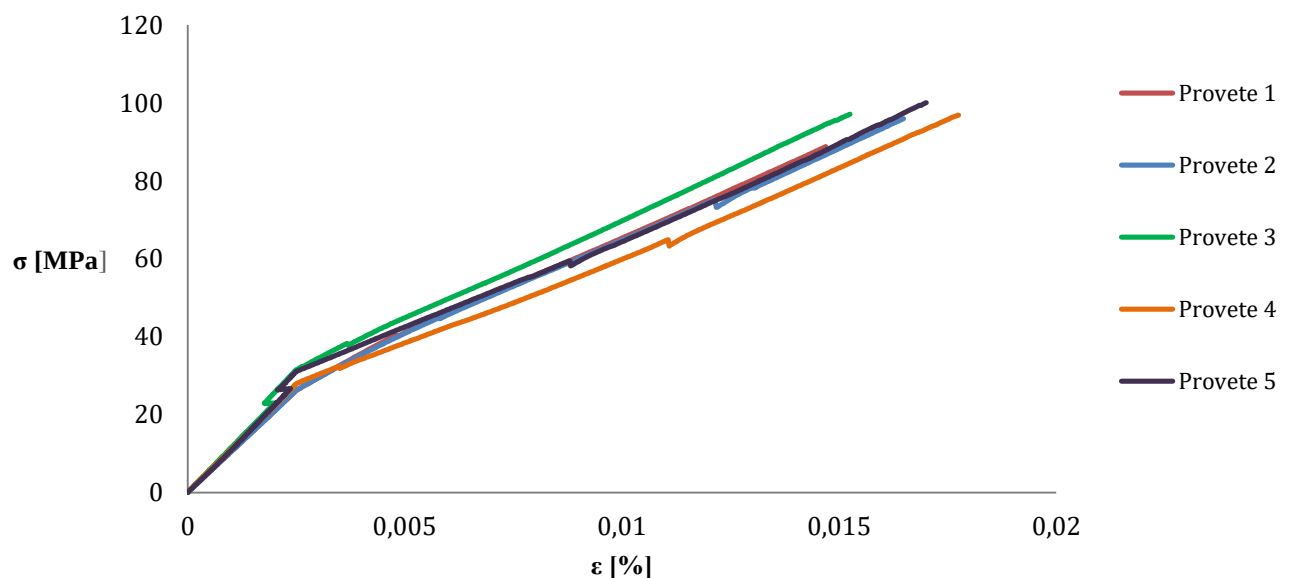


Figura 46 - Gráfico da tensão em função da deformação dos provetes do tipo L no teste de tração.

➤ Dados e resultados experimentais

Tabela 11 - Dados e resultados experimentais dos provetes do tipo L no ensaio de tração.

Proвете	Largura (mm)	Espessura (mm)	Tensão de rotura (MPa)	Deformação à rotura (%)	Módulo de elasticidade (GPa)
1	28,96	2,92	87,46	1,47	10,40
2	29,32	3,19	94,40	1,66	10,43
3	29,51	3,23	95,63	1,54	12,79
4	28,88	3,16	95,17	1,79	11,09
5	28,35	3,18	98,32	1,72	12,83

Anexo 6

Resultados da caracterização de compósitos do material A no teste de tração

➤ Propriedades mecânicas à tração

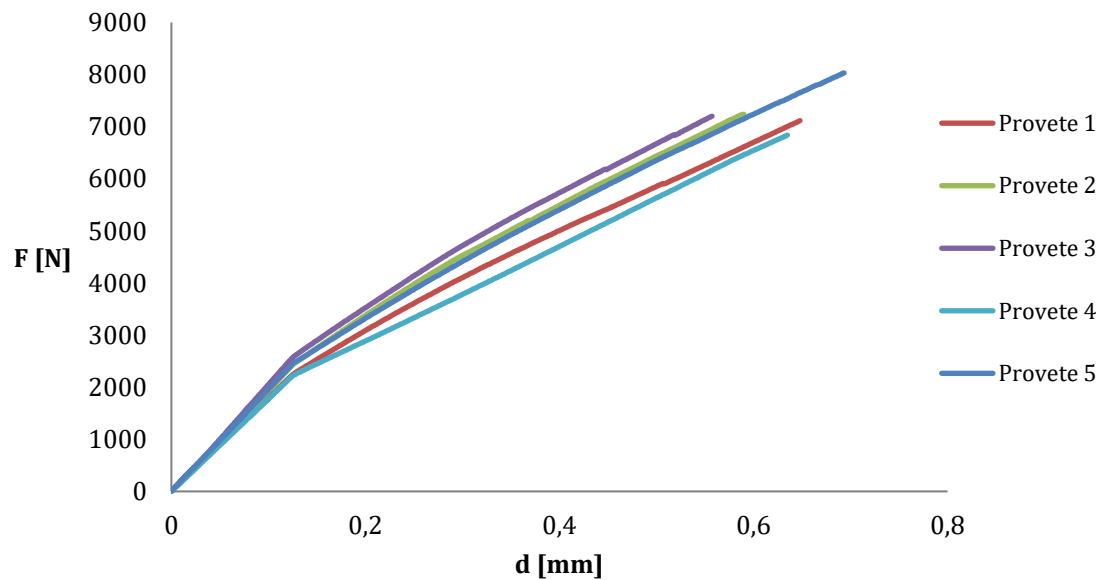


Figura 47 - Gráfico da força em função do deslocamento para os provetes do tipo A no ensaio de tração.

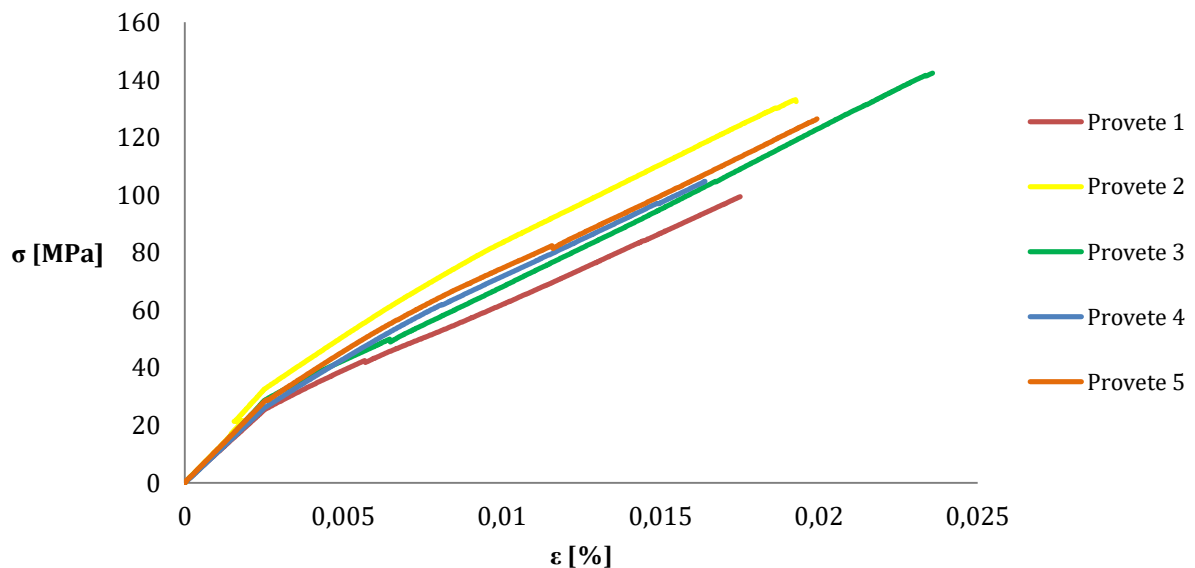


Figura 48 - Gráfico da tensão em função da deformação dos provetes do tipo A no teste de tração.

➤ Dados e resultados experimentais

Tabela 12 - Dados e resultados experimentais dos provetes do tipo A no ensaio de tração.

Proвете	Largura (mm)	Espessura (mm)	Tensão de rotura (MPa)	Deformação à rotura (%)	Módulo de elasticidade (GPa)
1	29,76	2,97	80,52	1,28	10,13
2	28,97	3,01	82,93	1,18	11,12
3	30,63	3,03	77,69	1,11	11,20
4	27,95	2,93	83,42	1,27	10,86
5	27,72	2,93	98,78	1,39	12,01